

10/563746

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
29. September 2005 (29.09.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2005/090906 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G01B 11/275**

(21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP2005/002940**

(22) Internationales Anmeldedatum:  
18. März 2005 (18.03.2005)

(25) Einreichungssprache: **Deutsch**

(26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch**

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2004 013 441.3 18. März 2004 (18.03.2004) **DE**

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von  
US): **BEISSBARTH GMBH [DE/DE]**; Hanauer Strasse  
101, 80993 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **DONNER, Karin**  
[DE/DE]; Am Sportfeld 2, 94121 Salzweg (DE). **BUX,**  
**Hermann [DE/DE]**; Lilienweg 1, 86559 Adelzhausen

(DE). **SCHOMMER, Stefan [DE/DE]**; Fastlingerring  
109, 85716 Unterschleissheim (DE). **ENGL, Rudolf**  
[DE/DE]; Nelkenweg 13, 84539 Ampfing (DE).

(74) Anwalt: **KIRSCHNER, Klaus, D.**; Böck Tappe  
Kirschner, Sollner Strasse 38, 81479 München (DE).

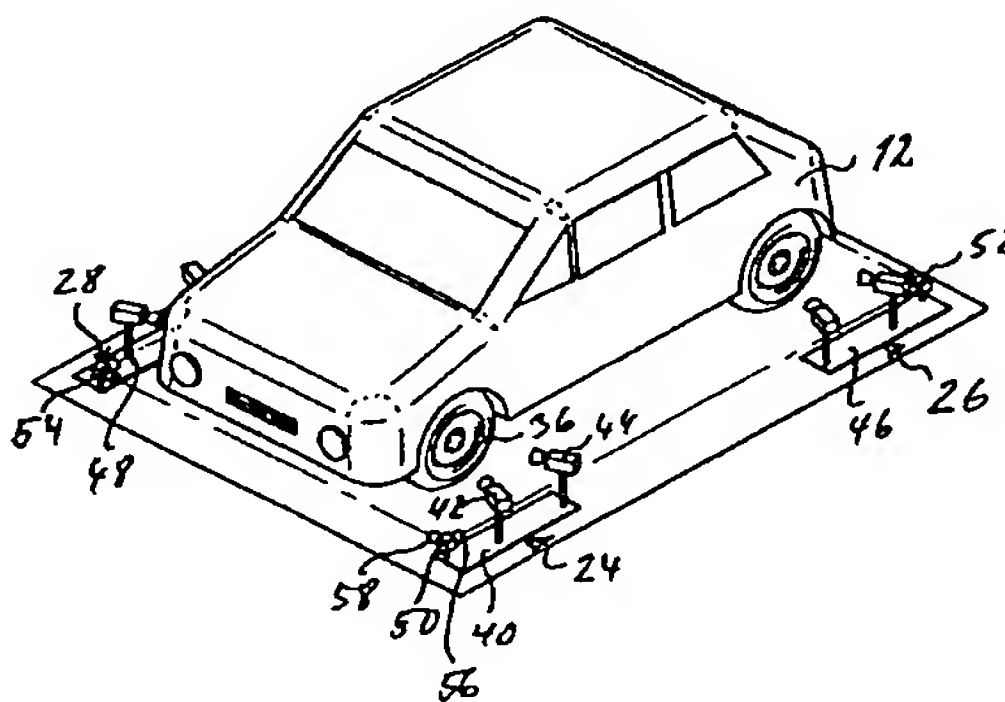
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): **AE, AG, AL,**  
**AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,**  
**CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,**  
**FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,**  
**KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,**  
**MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,**  
**PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ,**  
**TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA,**  
**ZM, ZW.**

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): **ARIPO (BW,**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: **MEASURING METHOD AND MEASURING UNIT FOR DETERMINING THE SPATIAL POSITION OF A WHEEL  
RIM, AND CHASSIS MEASURING DEVICE**

(54) Bezeichnung: **MESSVERFAHREN UND MESSGERÄT ZUR BESTIMMUNG DER RÄUMLICHEN LAGE EINER RAD-  
FELGE SOWIE FAHRWERKVERMESSUNGSEINRICHTUNG**



(57) Abstract: The invention relates to a method and unit for determining the spatial position of a wheel rim relative to a measuring unit having at least one camera, the wheel rim being located within the field of vision of the camera. This method involves: the provision of a model that describes, by means of model parameters, a model body of a localizable geometrical detail of the wheel rim and the spatial position of the model body relative to the measuring unit; the recording of an image of the geometrical detail of the wheel rim by using the camera; adapting the image of the model body, which results from the model parameters, to the image of the geometrical detail of the wheel rim by modifying model parameters of the model, and; tracking the modifications of the model parameters of the model during the adaptation. The data concerning the position of the model body of the geometrical detail of the wheel rim represent the spatial position of the geometrical detail of the wheel rim and thus the wheel rim itself when the image of the model body of the geometrical detail of the wheel rim resulting from the model parameters corresponds with the recorded image of the geometrical detail of the wheel rim within predetermined tolerance limits. The invention also relates to a method for measuring a chassis and to a chassis measuring device that uses said method and said unit.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/090906 A1



GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

**Erklärung gemäß Regel 4.17:**

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

**Veröffentlicht:**

— *mit internationalem Recherchenbericht*

(57) **Zusammenfassung:** Ein Verfahren und ein Gerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, umfaßt das Bereitstellen eines Modells, das einen Modellkörper eines lokalisierbares RadfelgenGeometriedetail sowie die räumliche Lage des Modellkörpers zu dem Meßgerät durch Modellparameter beschreibt, das Erfassen eines Bildes des Radfelgen-Geometriedetails der Radfelge mit der Kamera, das Anpassen der aus den Modellparametern resultierenden Abbildung des Modellkörpers an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells, und das Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells beim Anpassen, wobei die Daten bezüglich der Lage des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails die räumliche Lage des Radfelgen-Geometriedetails und damit der Radfelge selbst wiedergeben, wenn die aus den Modellparametern resultierende Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen übereinstimmt. Ferner werden ein Verfahren zur Fahrwerkvermessung und eine Fahrwerkvermessungseonrichtung unter Verwendung des genannten Verfahrens und des genannten Geräts angegeben.

**Meßverfahren und Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge  
sowie Fahrwerkvermessungseinrichtung**

5 Die Erfindung betrifft ein Meßverfahren und Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, sowie ein Fahrwerkvermessungsverfahren und eine Fahrwerkvermessungseinrichtung, bei der derartige Meßgeräte eingesetzt werden.

10 Aus DE 100 43 354.5 ist eine Fahrwerkvermessungseinrichtung mit Meßköpfen zur Bestimmung der Radstellungen der Räder eines Kraftfahrzeuges auf einem Meßplatz, wobei jeder Meßkopf wenigstens eine Kamera aufweist, die auf ein im Blickfeld der Kamera angeordnetes, in einer festen Beziehung zu dem Rad des Kraftfahrzeuges positioniertes Meßtarget ausgerichtet ist, und wobei die Bilder der Kamera von einer Auswertungseinheit ausgewertet werden, um die räumliche Lage des Meßtargets und damit des Rades bezüglich der Position der Kamera beziehungsweise des Meßkopfes  
15 zu bestimmen. Die Einrichtung hat ein optisches, in den Meßköpfen integriertes Referenzsystem zur Kalibrierung der Meßköpfe der Fahrwerkvermessungseinrichtung bezüglich der Position der Meßköpfe zueinander.

Fahrwerkvermessungseinrichtungen mit Meßgeräten, die zwei Kameras aufweisen, die unter unterschiedlichen Winkeln auf Targets an den Rädern gerichtet sind, sind auch aus den DE 197 57  
20 760, DE 197 57 763, DE 100 32 356 und DE 100 50 653 bekannt.

Bei diesen sogenannten berührungslosen Fahrwerkvermessungseinrichtungen müssen Meßtargets verwendet werden, da die räumliche Lage aus den Merkmalen des Rades oder der Radfelge selbst durch die direkte Bildauswertung der Bilder des Rades oder der Felge nicht hinreichend genau bestimmt werden kann.

25 Bei der DE 29 48 573 wird versucht, die räumliche Lage des Rades über eine Kreis- oder Ellipsenpassung an die Felgenhornkontur zu bewerkstelligen. Dies führt wegen der räumlichen Ausrundung des Felgenhorns zu systematischen Fehlern insbesondere beim Lenkradeinschlag. Diese Fehler rühren daher, dass irrtümlicherweise angenommen wird, die Felgenkontur sei das perspektivische Bild eines räumlichen Kreises, während in Wahrheit kein räumlicher Kreis perspektivisch beobachtet wird. Darüber  
30 hinaus sehen bei einem Zweikameraaufbau die beiden Kameras des Stereosystems nicht etwa die gleiche räumliche Kontur, sondern verschiedene Konturen.

Die Erfindung umfasst ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, das Bereitstellen eines Modells, das einen Modellkörper eines lokalisierbaren Radfelgen-

Geometriedetails sowie die räumliche Lage des Modellkörpers zu dem Meßgerät durch Modellparameter beschreibt, das Erfassen eines Bildes des Radfelgen-Geometriedetails der Radfelge mit der Kamera, das Anpassen oder Anfitten der aus den Modellparametern resultierenden Abbildung des Modellkörpers an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells, und das Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells beim Anpassen, wobei die Daten bezüglich der Lage des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails die räumliche Lage des Radfelgen-Geometriedetails und damit der Radfelge selbst wiedergeben, wenn die aus den Modellparametern resultierende Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen übereinstimmt.

Durch dieses Verfahren werden den tatsächlichen Gegebenheiten bei der Fahrwerkvermessung, das heißt der tatsächlichen Radfelge, Rechnung getragen, um die durch das Felgenhorn aufgespannte Radebene genau zu bestimmen. Die oben erwähnten systematischen Fehler bei den herkömmlichen Verfahren können damit vermieden werden.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass der Modellkörper ein sogenannter Schmiegetorus oder eine 3D-CAD-Darstellung ist. Während der Schmiegetorus die einfachste Form eines 3D-Modells für die Felgenreandkontur darstellt, kann auch eine 3D-CAD-Darstellung der betreffenden Felge verwendet werden, wodurch sich ebenfalls gute Ergebnisse erzielen lassen.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass im Falle des Schmiegetorus Modellparameter des Modells ein Hauptradius  $R$  und ein Nebenradius  $r$  des Torus, eine Position  $c$  des Toruszentrum, ein Normalenvektor  $n$  der Rotations-ebene des Torus und eine Position  $z$  des Projektionszentrums einer Lochkamera sind, mit der der Schmiegetorus betrachtet wird. Von diesen Modellparametern des Schmiegetorus sind einige aus den tatsächlichen Abmessungen der Radfelge und aus der Anordnung der Lochkamera bekannt, so dass die Zahl der Unbekannten in dem resultierenden Optimierungsproblem in vorteilhafter Weise reduziert und das Anpassen der Abbildung des Schmiegetorus an das Bild der tatsächliche Felge erleichtert wird.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass das Radfelgen-Geometriedetail die Felgenreandkontur ist. Obwohl auch andere Radfelgen-Geometriedetails als Grundlage für die Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge in Frage kommen, ist die Felgenreandkontur ein bevorzugtes Merkmal, weil dort ein hinreichend guter Kontrast zwischen der Radfelge und dem Reifen zu erwarten ist.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch ge-

kennzeichnet, dass die Radfelgenkontur mit zwei Kameras erfasst wird, die unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind. Wie noch gezeigt wird, wäre prinzipiell eine Kamera ausreichend als Grundlage für die Durchführung der Messungen gemäß der Erfindung. Zwei Kameras sind jedoch vorteilhaft in Bezug auf eine Fehlerkorrektur, um einen höheren Genauigkeitsgrad der Messung zu erhalten.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass das Bild der Radfelge auch zur Bestimmung eines Drehwinkel-Bezugspunktes an der Felge, der als Winkelausgangspunkt bei der Nachführung der Raddrehung dient, verwendet wird. Aus dem Drehwinkel und dem Normalenvektor der Felgenreibene kann die wahre Drehachse genau bestimmt werden.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung des Drehwinkel-Bezugspunktes an der Felge die Lage eines charakteristischen Merkmals auf dem Rad verwendet wird, wobei in vorteilhafter Weise als charakteristisches Merkmal zur Bestimmung des Drehwinkel-Bezugspunktes ein charakteristisches Merkmal der Felge oder ein Ventil des Rades verwendet wird. Da ein charakteristisches Merkmal eines Kraftfahrzeugrades, welches die Drehlage des Rades anzeigt, das Ventil ist, kann dieses ohne weitere Massnahmen am Rad als charakteristisches Merkmal verwendet werden. Es könnte auch ein Marker verwendet werden, um einen Drehwinkel-Bestimmungspunkt an der Felge zu markieren, wobei dazu wieder ein Kontakt mit dem Rad erforderlich wäre. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Lokalisierung des Ventils für die Zwecke der vorliegenden Messung ausreichend ist.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Segmentierung des Felgenumfangs eine Vorsegmentierung und eine Feinsegmentierung (Subpixelsegmentierung) durchgeführt wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht in vorteilhafter Weise eine Vereinfachung der erforderlichen Rechenoperationen, um die Segmentierung mit ausreichender Genauigkeit durchführen zu können.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die Daten bezüglich der Modellparameter des Modells, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn die Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, ausgegeben oder angezeigt werden.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist gekennzeichnet durch folgende Schritte: Starten der Bildaufnahme, Segmentierung der Felge, wobei eine Segmentierung des Ventils des Kraftfahrzeugrades erfolgt, Segmentierung des Felgenrandes; um vorgegebene Winkelbereiche des Felgenrandes auszumessen, Rekonstruktion der 3D-Lage des Felgenrandes, Anzeigen des Ergebnisses der Berechnung, nämlich des Normalenvektors und des Zentrumspunktes der

WO 2005/090906 PCT/EP2005/002940  
Felgenreandebene und/oder Speichern derselben für die weitere Verrechnung. Durch diese Ausgestaltung wird in vorteilhafter Weise eine Felgenschlagkompensation möglich.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Starten der Bildaufnahme zunächst überprüft wird, ob die Beleuchtung  
5 für die Messung ausreichend ist, und dass die Beleuchtung entsprechend nachgestellt wird.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die Nachstellung eine größere oder geringere Helligkeit des Lichtes für die Beleuchtung umfasst.

Das erfindungsgemäße Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu dem  
10 Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, ist gekennzeichnet durch einen Rechner, der programmiert ist, um eines der vorstehend beschriebenen Verfahren durchzuführen.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass in dem vorstehenden Meßgerät zwei Kameras vorgesehen sind, die die Radfelgenkontur  
15 erfassen und unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass es je Kamera einen optischen Sensor, eine Objektiv, eine Blendenstelleinrichtung und eine Fokusstelleinrichtung umfasst, und dass die Einbaulage des Sensors und des Objektivs, die Blendeneinstellung und Fokuseinstellung vorjustiert sind.

20 Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass bei Zoom-Objektiven zudem die eingestellte Brennweite vorjustiert ist.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Ausgabe- beziehungsweise Anzeigevorrichtung zum Ausgeben beziehungsweise Anzeigen der Daten bezüglich der Modellparameter des Modells, die die räumliche Lage  
25 der Radfelge definieren, wenn die Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, vorgesehen ist. Dadurch wird das Aufstellen des Meßplatzes erleichtert, weil die Feinjustage des Bezugssystems jederzeit erneut durchgeführt werden kann.

Im wesentlichen entsprechen die Vorteile des erfindungsgemäßen Meßgeräts beziehungsweise  
30 seine Ausführungsbeispiele dem Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens beziehungsweise seiner Ausführungsbeispiele, wie oben beschrieben wurde.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen, ist dadurch gekennzeichnet, dass eines der oben genannten Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät an den Rädern des Kraftfahrzeugs durchgeführt wird, dass die relativen

Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen bestimmt werden, dass die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umgerechnet werden, und dass die Radstellungswerte ausgegeben oder angezeigt werden.

5 Eine vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein  
10 Bezugssystem bestimmt werden, das an den Meßgeräten angeordnet ist.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist gekennzeichnet durch folgende Schritte: Durchführung der Messungen der einzelnen Meßgeräte; Einlesen der Meßergebnisse in einen Rechner; Berechnen der Transformationsmatrix aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung; Transformieren der Ergebnisvektoren der Meßgeräte in das Rechenkoordinatensystem  
15 über Versatzwinkel und Abstände aus dem Bezugsmeßsystem; Bestimmen der Radstellungswerte in dem Rechenkoordinatensystem durch Auswertung der Stellung der Ergebnisvektoren zueinander zur Berechnung der entsprechenden Fahrwerksmesswerte; Übergeben der Ergebnisse zu den Radstellungs-Winkelwerten an eine Anzeigeeinrichtung und/oder Speichern derselben zur weiteren Verwendung.

20 Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen und der vorteilhaften Ausgestaltungen liegen darin, dass die oben beschriebenen Meßgeräte und das entsprechende Verfahren in vorteilhafter Weise zur genauen Vermessung des gesamten Fahrwerks an Kraftfahrzeugen eingesetzt werden können.

Eine erfindungsgemäße Fahrwerkvermessungseinrichtung für Kraftfahrzeuge ist gekennzeichnet durch Meßgeräte zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät an den  
25 Rädern des Kraftfahrzeugs, die auf einem Meßplatz derart positioniert sind, dass ein Meßgerät jeweils einem der Räder des Kraftfahrzeugs zugeordnet ist, wobei die relativen Positionen der Meßgeräte bei der Durchführung der Messungen bestimmt sind, einen Rechner, der die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte  
30 in Radstellungswerte umrechnet, und durch eine Anzeige/Ausgabeeinrichtung, die die Radstellungswerte ausgibt oder anzeigt.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem bestimmt werden, das an den Meßgeräten angeordnet ist.

5 Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass beim Zusammenbau zweier Kameras in einem Meßgerät zu einem Stereo-Meßsystem die Kameras bezogen auf das Koordinatensystem des Meßgeräts kalibriert sind.

Die Vorteile der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung für Kraftfahrzeuge entsprechen denen, die im Zusammenhang mit dem Verfahren zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen beschrieben wurden.

10 Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nun anhand der beiliegenden Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines rotierenden Körpers mit Normalenvektor einer ausgezeichneten Ebene;

15 Fig. 2 eine schematische Darstellung, wie sich am Beispiel einer Kugel mit einer Veränderung der Lichtquellen auch die Schattengrenzen verändern;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Randkontur beziehungsweise der Schattengrenze einer Ringfläche;

Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Querschnitts durch die Felgenhornzone eines Kfz-Rades mit eingezeichneter Lage des Querschnittskreises des Schmiegetorus;

20 Fig. 5 schematische Darstellung eines Schnittbilds des Torus in der Schnittebene  $E_{\varphi}$ ;

Fig. 6 eine schematische Darstellung der Fehlrekonstruktion durch klassisches Stereomatching bei einer ringförmigen Objektgeometrie im Schnittbild;

Fig. 7 eine schematische Darstellung von Torus, Radachse und Radmittelebene bei einem Kfz-Rad;

25 Fig. 8 eine schematische Darstellung des Torus zum Felgenhorn bei einem Kfz-Rad;

Fig. 9 eine schematische Darstellung einer Fahrwerkvermessungseinrichtung mit ortsfest angeordneten Meßgeräten;

Fig. 10 eine schematische Darstellung einer Fahrwerkvermessungseinrichtung mit ortsfest angeordneten Meßgeräten und Bezugssystem zur Justage der Meßgeräte untereinander;

30 Fig. 11 ein schematisches Gesamt-Ablaufdiagramm für die Fahrwerkvermessung eines Kraftfahrzeugs;

Fig. 12 ein detaillierteres Gesamt-Ablaufdiagramm für die Fahrwerkvermessung eines Kraftfahrzeugs;

Fig. 13 eine Ablaufdiagramm für die Felgenschlagkompensation beziehungsweise die Bestim-

Fig. 14 eine Ablaufdiagramm für die Bestimmung des aktuellen Spur- und Sturzwinkels des Rades.

5 Bestimmung der räumlichen Lage eines rotierenden Körpers

Wenn zur Bestimmung der räumlichen Lage eines rotierenden insbesondere rotationssymmetrischen Körpers weder Targets noch Marken an dem Körper aufgebracht werden und der rotierende Körper nicht von vornherein gut verfolgbare ausgezeichnete Punkte hat, können lokalisierte Geometriedetails in der folgenden Art und Weise erfasst werden. Man ermittelt ausgezeichnete Geometriedetails (etwa Punkte, Kanten, Flächen) des rotierenden Körpers im Raum durch eine algorithmische Rekonstruktion aus vorzugsweise perspektivischen Bildern des Körpers. Man verfolgt diese ausgezeichneten Geometriedetails während der Drehung des Körpers. 3D-Punkte bewegen sich dann auf Kreisbahnen im Raum, Kanten und Flächennormalen beschreiben Rotationsflächen um die wahre Drehachse.

15 Hierzu wird zunächst ein vorzugsweise parametrisches 3D-Modell eingesetzt, das einen gut lokalisierbaren Teil der realen Geometrie der rotierenden Körpers beschreibt. Solche 3D-Modelle können etwa Quader, Zylinder, Ringflächen oder sogar ganze 3D-CAD-Entwürfe sein. Abhängig von der Position im Raum und den Parametern des 3D-Modells kann man das perspektivische Bild des 3D-Modells berechnen. Hat man nun umgekehrt ein perspektivisches Bild des 3D-Modells, kann man die räumliche Lage und die Strukturparameter des 3D-Modells bestimmen. Da ein geeigneter Bildausschnitt des realen Körpers genau diesem perspektivischen Bild des 3D-Modells entsprechen muss, erhält man so ein in den gegebenen Körper algorithmisch eingepasstes 3D-Modell.

25 Ist die wahre Rotationsachse des Originalkörpers nicht zugleich eine Rotationssymmetrieachse des eingepassten 3D-Modells, kann man die rotatorische Lage des Originalkörpers aus der Lage des eingepassten 3D-Modells berechnen. So beschreiben etwa die Normalenvektoren einer nicht senkrecht zur Rotationsachse stehenden Schmiegeebene während der Rotation des Originalkörpers einen Kreiskegel, dessen Zentrale die Rotationsachse ist, wie aus Figur 1 ersichtlich ist.

Ist die Rotationsachse einmal bestimmt, kann man durch Anmessen der ausgezeichneten Ebene auch dann auf die Lage der Rotationsachse zurückschließen, wenn sich die Position des rotierenden Körpers zwischenzeitlich verändert haben sollte. Diese Grundidee führt bei der Achsvermessung von Rädern zu der Frage, wie man ein für die unterschiedlichsten Felgengeometrien ausreichend allgemeines lokalisiertes 3D-Modell gewinnen kann.

Dieses Vorgehen benötigt bei genügend reichhaltigen parametrisierten 3D-Modellen grundsätzlich nur eine perspektivische Sicht zur Geometrierekonstruktion. Mehrere Kameras können jedoch

#### Anwendung auf die Bestimmung der räumlichen Lage einer Felge

Die räumliche Lage eines Objektes kann auch dann aus perspektivischen Bildern wiederge-  
wonnen werden, wenn man zwar keine verfolgbaren einheitlichen Raumkonturen oder markante  
5 Punkte zur Verfügung hat, wohl aber ausreichendes Nebenwissen über die prinzipiell mögliche Geo-  
metrie in Form eines parametrisierten 3D-Modells. Dies werde exemplarisch am Beispiel des 3D-  
Modells einer Ringfläche durchgeführt. Ähnliche Ansätze sind jedoch auch mit anderen lokalen 3D-  
Modellen möglich. Insbesondere kommen für die Achsvermessung durch Felgenhornapproximation  
10 auch verallgemeinerte Ringgeometrien in Frage. Die Querschnittskurven solcher verallgemeinerter  
Ringflächen sind dann etwa Kreisbogensplines, d.h. stückweise glatt aus Kreisbögen zusammenge-  
setzte Kurven.

Liegt erweitertes Wissen über die Felgeometrie vor (etwa ein CAD-Entwurf), kann auch ein  
wesentlich komplexeres 3D-Modell an die Felgeometrie angepasst werden, wobei dann auch Be-  
15 reiche abseits vom Felgenhorn zur Approximation in Frage kommen.

Da alle Felgen im Randbereich zum Reifen lokal eine ringförmige Geometrie aufweisen, wird  
hier eine lokale Ringfläche im Bereich des Felgenrands so angefügt, dass die von der Kamera gese-  
hene Randkontur der Felge und der angefügten, gedachten Ringfläche gleich werden. Eine solche  
Ringfläche entspricht einer Schmiegefläche im Bereich des Felgenhorns, genauer der sogenannten  
20 extremalen Schattengrenze aus der Sicht der Kamera.

Beleuchtet man einen gegebenen, räumlichen Körper mit einer punktförmigen Lichtquelle, er-  
hält man als Grenzpunktmenge zwischen beleuchteten und unbeleuchteten Regionen auf dem räumli-  
chen Körper eine Vereinigung von Kurven, den Schattengrenzen. Verbindet man jeden Punkt einer  
Schattengrenze mit dem Lichtquellpunkt durch eine Gerade, entsteht ein Randstrahlenkegel, wie in  
25 Figur 2 gezeigt ist.

Bei punktförmiger Beleuchtung einer typischen Felge von der Sichtseite aus gibt es genau eine  
Schattengrenze, deren Randstrahlenkegel alle anderen Randstrahlenkegel, die beispielsweise von  
Aussparungen in der Felge herkommen können, enthält. Diese Schattengrenze entspricht der Außen-  
kontur der Felge und wird als extremale Schattengrenze bezeichnet. Ersetzt man die punktförmige  
30 Lichtquelle durch eine Lochkamera, deren Projektionszentrum mit dem vorherigen Lichtquellpunkt  
übereinstimmt, so tritt das perspektivische Bild der extremalen Schattengrenze als Randkontur gegen  
den Hintergrund, beispielsweise den Reifen auf.

Die extremale Schattengrenze einer Ringfläche oder einer Felge ist im Allgemeinen keine ebe-  
ne räumliche Kurve, insbesondere kein Kreis, es sei denn, das Projektionszentrum liegt auf der Rotati-

5  
 10  
 15  
 20  
 25  
 30

onsachse der Ringfläche oder Felge. Das perspektivische Bild ist in der Regel keine Ellipse. Für zwei Lochkameras mit verschiedenen Projektionszentren sind die extremalen Schattengrenzen verschieden (Figur 2). Dies bedeutet, dass eine Interpretation der Randkontur als Bild einer einheitlichen Raumkurve und damit eine übliche Stereorekonstruktion über Epipolarbedingungen notwendigerweise zu Fehlrekonstruktionen führen muss.

Die extreme Schattengrenze einer Felge variiert zwar je nach Beobachterposition und Radeinschlag, liegt aber typischerweise im Bereich der stärksten Querschnittskrümmung des Felgenhorns. In diesem Bereich sind Felgen rotierend und lassen sich dort sehr gut durch eine Ringfläche annähern, die als Schmiegetorus bezeichnet wird. Die Schattengrenze dieser Ringfläche aus der Sicht der Lochkamera stimmt mit der Schattengrenze der Felge überein. Die zur Rotationssymmetrieachse des Schmiegetorus senkrecht stehende Symmetrieebene wird im Folgenden als Schmiegetorusebene oder Felgenrandebene bezeichnet.

Figur 3 zeigt die Randkonturen beziehungsweise perspektivische Bilder der Schattengrenzen einer Ringfläche. Die äußere Kontur a ist das Bild der extremalen Schattengrenze. Die Innenkontur b würde dem Ringloch entsprechen. Figur 4 zeigt einen Querschnitt durch die Felgenhornzone eines Kfz-Rades mit eingezeichneter Lage des Querschnittskreises des Schmiegetorus. Die extreme Schattengrenze verläuft in dem mit Pfeilen markieren Bereich, wobei sie die Querschnittsebene durchstößt. Es wird also die extreme Schattengrenze des Schmiegetorus aus der jeweiligen perspektivischen Sicht als anzupassendes 3D-Modell verwendet. Die Parameter der extremalen Schattengrenze des Schmiegetorus bestimmen aber auch den Schmiegetorus selbst eindeutig.

Im folgenden wird die Berechnung der Konturkurven des perspektivischen Bilds einer Ringfläche beschrieben. Um die Schattengrenze einer Ringfläche geschlossen mathematisch zu beschreiben, wird ein Zylinderkoordinatensystem so orientiert, dass die Rotationsebene der Ringfläche die  $(r, \varphi)$ -Ebene wird und die Rotationsachse die z-Achse. Gegeben sei ein Torus  $T$  mit einem Zentralkreisradius  $R$  und einem Schnittkreisradius  $r$  für eine durch die Rotationsachse des Torus gehende Schnittebene, zentriert um  $0 = (0, 0, 0)$  mit Rotationsachse in Richtung  $e_3 = (0, 0, 1)$ ,  $r < R$ , d.h. dass der Zentralkreis des Torus in der x-y-Ebene liegt. Weiter bezeichne  $z = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$  ein zentralperspektivisches Projektionszentrum im Außengebiet des Torus mit  $\zeta_3 > r$ , sowie  $E$  eine Projektionsebene (gleich Chipebene der Kamera) ist, wobei  $z$  nicht in  $E$  enthalten ist. Ist  $u$  der Lotfußpunkt von  $z$  in der Projektionsebene  $E$  und  $(n_1, n_2, n_3)$  eine orthonormale Basis derart, dass

$$n_3 = \frac{z - u}{\|z - u\|}$$

( $\|z - u\|$  = Abstand von  $z$  und  $u$ ), wird  $(u, n_1, n_2)$  das affine Bildkoordinatensystem in der Projektionsebene, was bedeutet, dass die Richtung von dem optischen Projektionszentrum senkrecht auf die Retinaebene die optische Achse des affinen Koordinatensystems ist.

5

Bekannt ist:

- (1) Zu jedem Punkt  $x = (\xi_1, \xi_2, \xi_3) \in T$  gibt es genau einen Winkel  $\varphi \in [0, 2\pi[$  derart, dass

10

$$\xi_1 = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} \cos \varphi$$

$$\xi_2 = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} \sin \varphi$$

$\varphi$  heißt „der zu  $x$  gehörige Polarwinkel“.

- (2) Zu jedem Winkel  $\varphi \in [0, 2\pi[$  gibt es Punkte  $x \in T$  mit den folgenden Eigenschaften:

(a)  $\varphi$  ist der zu  $x$  gehörige Polarwinkel,

(b)  $z - x$  ist ein Tangentialvektor an  $T$  im Punkt  $x$ , d.h.  $x$  ist  $T$ -Berührungspunkt einer Geraden durch  $z$ .

- $x$  ist also ein Punkt auf der Schattengrenze von  $T$  bzgl. des Projektionszentrums  $z$ . Unter allen Punkten mit den Eigenschaften (a) und (b) sei  $s_\varphi$  derjenige mit größtem Nullpunktsabstand (extremaler Schattengrenzpunkt!).

Zur Bestimmung von  $s_\varphi$  bezeichne  $E_\varphi$  die Ebene durch  $e_3$  und durch den auf  $e_3$  senkrecht stehenden Einheitsvektor  $a_\varphi = (\cos \varphi, \sin \varphi, 0)$ . Alle Punkte  $x \in T$  mit Polarwinkel  $\varphi$  liegen in  $E_\varphi$ .

- Speziell gilt  $s_\varphi \in E_\varphi$ . Die Tangentialebene an  $T$  im Punkt  $s_\varphi$  steht senkrecht auf  $E_\varphi$ . Insbesondere ist der Durchschnitt  $g$  dieser Tangentialebene mit  $E_\varphi$  die Tangente im Punkt  $s_\varphi$  an den Torus-Schnittkreis  $K$  mit der Gleichung

$$(\xi - R)^2 + \eta^2 = r^2$$

30

für Punkte  $\xi a_\varphi + \eta e_3$  in  $E_\varphi$ . Der Orthogonalprojektionspunkt  $z_\varphi$  von  $z$  in  $E_\varphi$  (Orthogonalprojektion

Bezeichnet  $\langle z | v \rangle$  das Skalarprodukt eines Vektors  $v$  und des Vektors  $z$ , erhält man durch Berechnung der orthogonalen Projektion:

5 
$$z_\varphi = \langle z | a_\varphi \rangle a_\varphi + \langle z | e_3 \rangle e_3 = (\zeta_1 \cos \varphi + \zeta_2 \sin \varphi) a_\varphi + \zeta_3 \cdot e_3$$

Um die Koordinaten  $\alpha_\varphi, \gamma_\varphi$  von  $s_\varphi$  bzgl. der Basis  $(a_\varphi, e_3)$  der Ebene  $E_\varphi$  zu bestimmen, beachte man, dass die Tangente  $g$  den Schnittkreis  $K$  berührt. Ein Punkt  $\xi \cdot a_\varphi + \eta \cdot e_3$  in  $E_\varphi$  liegt genau dann auf der Tangente  $g$  an  $K$  im Punkt  $s_\varphi = \alpha_\varphi a_\varphi + \gamma_\varphi \cdot e_3$  ( $\alpha_\varphi, \gamma_\varphi$  noch zu bestimmen!),

10 wenn

$$(\xi - R)(\alpha_\varphi - R) + \gamma_\varphi \eta = r^2.$$

Der Punkt  $z_\varphi$  muss auf dieser Tangente liegen. Also gilt:

15

$$((\zeta_1 \cos \varphi + \zeta_2 \sin \varphi) - R)(\alpha_\varphi - R) + \zeta_3 \cdot \gamma_\varphi = r^2$$

und

20

$$(\alpha_\varphi - R)^2 + \gamma_\varphi^2 = r^2.$$

Setzt man  $\rho_\varphi \stackrel{\text{def}}{=} \zeta_1 \cos \varphi + \zeta_2 \sin \varphi - R$ , erhält man aus

25

$$\zeta_3^2 (\alpha_\varphi - R)^2 + \zeta_3^2 \gamma_\varphi^2 = \zeta_3^2 r^2 : \zeta_3^2 (\alpha_\varphi - R)^2 + (r^2 - \rho_\varphi (\alpha_\varphi - R))^2 = r^2 \zeta_3^2. \text{ Es folgt}$$

$$(\alpha_\varphi - R)^2 (\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2) - 2(\alpha_\varphi - R) \cdot \rho_\varphi \cdot r^2 = r^2 (\zeta_3^2 - r^2).$$

Man erhält

$$\alpha_\varphi - R = \frac{\rho_\varphi r^2}{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2} \pm \sqrt{r^2 \frac{\zeta_3^2 - r^2}{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2} + \frac{\rho_\varphi^2 r^4}{(\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2)^2}} = r \cdot \frac{\rho_\varphi r \pm |\zeta_3| \sqrt{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2 - r^2}}{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2}.$$

Weil  $s_\varphi$  der Berührungspunkt mit größter Norm in der Darstellung von Figur 5 ist, erhält man:

$$5 \quad \alpha_\varphi = R + r \cdot \frac{\rho_\varphi r + \zeta_3 \sqrt{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2 - r^2}}{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2} \quad \text{und}$$

$$\gamma_\varphi = \frac{1}{\zeta_3} \left( r^2 - \rho_\varphi \cdot r \frac{\rho_\varphi r + \zeta_3 \sqrt{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2 - r^2}}{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2} \right)$$

$$= \frac{1}{\zeta_3 (\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2)} (\zeta_3^2 r^2 - \zeta_3 \sqrt{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2 - r^2} \cdot \rho_\varphi \cdot r) = \frac{r(r\zeta_3 - \sqrt{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2 - r^2} \cdot \rho_\varphi)}{\zeta_3^2 + \rho_\varphi^2}.$$

10

Die Funktionsgleichung der extremalen Schattengrenzkurve (in Abhängigkeit von  $\varphi$ ), die die Punkte der Schattengrenze enthält, ist damit  $\varphi \rightarrow s_\varphi = \alpha_\varphi a_\varphi + \gamma_\varphi e_3$  mit diesen Einsetzungen für  $\alpha_\varphi$  und  $\gamma_\varphi$ .

15 Um das zentralperspektivische Bild der extremalen Schattengrenze, also die Randkontur zu ermitteln, benötigt man zunächst die Zentralprojektion  $p$  in die Projektionsebene  $E$  mit Projektionszentrum  $z$ .

Für jeden Punkt  $x$  des Raumes, der nicht auf der zu  $E$  parallelen Ebene durch  $z$  liegt, gilt:

$$\frac{p(x) - u}{\|z - u\|} = \frac{x - z - \langle x - z | n_3 \rangle n_3}{\langle x - z | n_3 \rangle}$$

20

Hierbei ist  $\|z - u\|$  die Länge des Vektors  $z - u$ , also der Abstand des Projektionszentrums  $z$  von der Projektionsebene  $E$ , und  $\langle x - z | v \rangle$  bezeichnet wieder das Skalarprodukt von  $x - z$  mit einem Vektor  $v$ .

Es folgt

25

$$p(x) = u + \frac{\|z - u\|}{\langle x - z | n_3 \rangle} \cdot (\langle x - z | n_1 \rangle n_1 + \langle x - z | n_2 \rangle n_2)$$

weil  $x - z = \langle x - z | n_1 \rangle n_1 + \langle x - z | n_2 \rangle n_2 + \langle x - z | n_3 \rangle n_3$ .

Durch Einsetzen von  $s_\varphi$  in  $p$  erhält man die Randkontur:  $\varphi \rightarrow p(s_\varphi)$  in kartesischen Koordinaten.

5

In Bildkoordinaten der Projektionsebene  $E$  ist

$$\varphi \rightarrow \begin{pmatrix} \langle p(s_\varphi) - u | n_1 \rangle \\ \langle p(s_\varphi) - u | n_2 \rangle \end{pmatrix} = \frac{\|z - u\|}{\langle s_\varphi - z | n_3 \rangle} \cdot \begin{pmatrix} \langle s_\varphi - z | n_1 \rangle \\ \langle s_\varphi - z | n_2 \rangle \end{pmatrix}$$

- 10 die Funktionsgleichung der Randkontur, d.h. der Schattengrenze.

Man beachte, dass die Funktionsgleichung der Randkontur nicht nur von  $r$  und  $R$  sondern auch von der relativen Lage von  $z$  und  $E$  in Bezug auf den Torus  $T$  abhängt. Hält man  $z$  und  $E$  fest und bewegt den Torus, erhält man die gleiche Randkontur, als hätte man den Torus in Normallage belassen, aber  $z$  und  $E$  invers bewegt. Die Gestalt der Randkontur bestimmt also die relative Lage der Hauptebe-

- 15 ne des Torus in Bezug auf das Kamerakoordinatensystem  $(n_1, n_2, n_3)$ .

Setzt man nach Festlegung des Normalenvektors der Retinaebene und des Fokusabstands des Projektionszentrums von der Retinaebene über die hierdurch festgelegte Zentralprojektion  $p$ . Der zu  $\varphi$  gehörige Randkonturpunkt ist dann  $p(s_\varphi)$ , der in Bildkoordinaten wie oben beschrieben ausgedrückt werden kann.

- 20 Es ist zu beachten, dass die inhärenten Parameter dieser Zentralprojektion, nämlich die Position  $z$  des Projektionszentrums, der Fokusabstand und der Normalenvektor der Retinaebene im Rahmen einer Kalibrierung der Kamera erhalten werden. Sie sind deshalb vor dem Meßprozeß bekannt.

Ziel der im Folgenden erläuterten Berechnung ist die Rekonstruktion der Schmiegetorusfläche aus der Randkontur, d.h. der perspektivischen Sicht der extremalen Schattengrenze am Felgenhorn.

- 25 Dazu werden die Modellparameter des Schmiegetorus (im Rahmen einer nicht-linearen Optimierungsroutine) solange verändert, bis die Außenkontur des Schmiegetorus mit der gemessenen extremalen Schattengrenze der Felge zur Deckung kommt. Der Normalenvektor der Rotationsebene des Schmiegetorus kann dann zu einer präzisen Rekonstruktion der Drehachse verwendet werden.

- 30 Die Rekonstruktion des Schmiegetorus aus der Randkontur läßt sich als nicht-lineares Optimierungsproblem formulieren. Die extremale Schattengrenze einer Ringfläche hängt von den folgenden Parametern ab: Hauptradius  $R$  und Nebenradius  $r$  des Torus, Position  $c$  des Toruszentrum und Normalenvektor  $n$  der Rotationsebene des Torus in Bezug auf das Kamerakoordinatensystem  $(n_1, n_2, n_3)$

sowie von der Position  $z$  des Projektionszentrums der Lochkamera. Da  $z$  vorab durch Kalibrierung bestimmt wird, soll diese Abhängigkeit im Folgenden nicht mehr erwähnt werden. Bis auf eine Koordinatentransformation des Normalenvektors  $n$  auf die  $z$ -Achse und des Toruszentroids  $c$  in den Ursprung ist die Gleichung der extremalen Schattengrenze oben hergeleitet worden.

5 Um die Abhängigkeit dieser Darstellung von den Parametern  $R, r, c$  und  $n$  auszudrücken, betrachte man die Konturpunkte  $p(s_\varphi)$  als Funktion. Diese ergibt sich aus obiger Darstellung von  $p(s_\varphi)$ , wenn man die Umrechnung von Kamerakoordinaten auf das oben verwendete Koordinatensystem vorschaltet.

10 Hat man nun ausreichend viele Randkonturpunkte  $x_1, \dots, x_n$  aus dem zentralperspektivischen Bild der Lochkamera ermittelt und sind die Kameraparameter und damit die Lage des Projektionszentrums  $z$ , des Hauptpunktes  $u$  sowie das Kamerakoordinatensystem  $(n_1, n_2, n_3)$  (siehe Anhang 1) aus einer Vorabkalibrierung bekannt, sucht man Parametervektoren  $c$  und  $n$  sowie Radien  $r, R$  derart, dass für geeignete zu  $x_1, \dots, x_n$  und zugehörige Polarwinkel  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  das Fehlerquadrat

15 
$$\sum_{i=1}^n \|f(R, r, c, n, \varphi_i) - x_i\|^2$$

minimal wird. Hierbei bezeichnet  $\|y-z\|$  den euklidischen Abstand zweier Punkte  $y, z$  in der Bildebene.

20 Bei bekanntem Schmiegetorusradius  $R$  kann dieser fest eingesetzt und damit als Unbekannte eliminiert werden. Die Ermittlung der zu den Randpunkten  $x_1, \dots, x_n$  gehörigen Winkelargumente  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  müsste im Idealfall seinerseits in die Gesamtminimierung mit einbezogen werden. Im hier vorliegenden Fall reicht jedoch eine gute Vorapproximationsheuristik aus, um diese Winkelargumente mit hoher Genauigkeit zur Verfügung zu stellen. Während der Normalenvektor  $n$  der Schmiegetorusebene auch aus einer Perspektive eindeutig ermittelbar ist, gilt dies nicht mehr für  $c, r, R$ . Bei bekanntem  $R$  reicht  
25 jedoch eine Monokamerasicht aus.

Auch aus Gründen der höheren Fehlerstabilität, insbesondere bei einer Beobachterposition in der Nähe der Rotationsachse der Felge, werden zwei Kameras in genau vermessener räumlicher Position (Stereosystem) verwendet. Die obige Quadratsumme ist dann mit einem gleichartigen Fehlerterm für die zweite Lochkamera zu versehen.

30 Zur hinreichend genauen Ermittlung der Randkonturen der Felge gegen den Reifenhintergrund sind normale Konturextraktionsverfahren der Bildverarbeitung wegen des oft schwach ausgeprägten Kontrastes der Felgenhornaußenseite gegen den Reifen nicht ausreichend. Daher werden verfeinerte Konturschätzer unter Einbeziehung des Nebenwissens über die torischen Randgeometriebeziehungen

Wird die Raddrehachse im Raum verändert, führt das Rad eine freie Bewegung im Raum aus (Translation und Rotation). Da die relative Lage der Drehachse im Verhältnis zum angepassten 3D-Modell bei einer Achsvermessung konstant bleibt, kann man auf die Lage der Drehachse aus der Lage  
5 des angepassten 3D-Modells zurückschließen. Hat das angepasste 3D-Modell zusätzlich Symmetrien, benötigt man lageidentifizierende Kenngrößen. Bei einem Schmiegetorus ist hierzu eine Polarwinkelangabe in der Schmiegetorusebene nötig.

Dieser Polarwinkel kann etwa durch Erfassung der rotatorischen Position des Radventils bestimmt werden. Prinzipiell sind jedoch auch viele andere Arten der Drehwinkelermittlung möglich. Wegen der in der Regel eher geringen Abweichung der Zentrale des Schmiegetorus gegenüber der Rotationsachse des Rades reicht zur Bestimmung der Drehachslage im Raum im Allgemeinen eine Genauigkeit dieses Drehwinkels etwas unter 1 Winkelgrad aus.  
10

Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die Schattenkonturen der Felge je nach perspektivischer Beobachungsposition, wie anhand von Figur 2 erläutert wird. Aus Figur 6 ist nun ersichtlich, dass dies zu einer Fehlrekonstruktion durch klassisches Stereomatching bei einer ringförmigen Objektgeometrie führt. Die Schnittpunkte der Sichtstrahlen von Randkonturen liegen nicht auf einer Parallelen zur Torusebene. Die auf beiden Kameras gesehenen Randkonturen stammen für verschiedene Sichtpositionen von verschiedenen Raumkurven. Führt man deshalb in der irrigen Annahme, es handle sich um ein und dieselbe Raumkurve, eine klassische Stereorekonstruktion (durch Schnitt der vermeintlichen Sichtstrahlen) durch, gelangt man zu Fehlrekonstruktionen von nicht auf der Felge liegenden  
15 Raumkurven, die man für den realen Felgenrand hält. Die Passebene einer solchen scheinbaren Felgenrandkurve stimmt im Allgemeinen nicht mit der oben beschriebenen Schmiegetorusebene überein. Insbesondere bei stärkerem Lenkradeinschlag sind die Abweichungen der jeweiligen Normalenvektoren nicht mehr zu vernachlässigen.  
20

25

#### Die Fahrwerkvermessungseinrichtung

Figur 6 zeigt die geometrischen Verhältnisse, die allgemein anhand von Figur 1 dargestellt wurden in Bezug auf die Verhältnisse bei einer Felge beziehungsweise einem Rad für ein Kraftfahrzeug. Wenn der Torus auf den Felgenrand gefittet ist, ist die Torusebene die Felgenrandebene. Diese  
30 ist auch bei gedrehtem Rad mit hoher Genauigkeit rekonstruierbar. Es handelt sich also um eine ausgezeichnete Ebene des Rads. Die Annahme, dass der Normalenvektor dieser Ebene ein Vektor in Richtung der Drehachse sei, ist jedoch im Allg. falsch (Felgenschlag!). Durch Rotieren des Rades bei kontrolliertem Drehwinkel wird sich aber der Normalenvektor der Felgenrandebene auf einem Rotationskegel um die wahre Drehachse bewegen. Aus mindestens 3 solchen rotierten Positionen lässt sich

nun die wahre Drehachse des Rades berechnen und ihre Raumwinkelstellung zum Normalenvektor der Felgenreandebene angeben. Diese festgelegte, konstante Beziehung zwischen dem Normalenvektor der Felgenreandebene und der Drehachse erlaubt es später, allein aus der Kenntnis der Felgenreandebene und des Rotationswinkels des Rades die Drehachse präzise zu bestimmen.

5 Nur bei fertigungstechnisch zugesicherten felgenschlagfrei montierten Rädern kann die Gleichheit des Normalenvektors der Felgenreandebene mit dem wahren Drehachsvektor angenommen werden. In jedem Fall muss die Felgenreandebene zur Drehachsermittlung bestimmt werden.

Die Position des Toruszentrum ist bei idealen Felgen als Durchstoßpunkt der Raddrehachse durch die repräsentative Felgenebene anzusehen und ergibt zusammen mit dem Normalenvektor das  
10 Meßergebnis des Stereomeßsystems.

Figur 8 zeigt schematisch das Felgenhorn 2 einer Felge 4. Wie ersichtlich ist, wird der Felgenhornradius in dem Bereich, der von einer seitlich von dem Felgenrand angeordneten Kamera erfaßt wird, in guter Näherung durch den Torus dargestellt.

Figur 9 zeigt einen Meßplatz 10, auf dem ein Kraftfahrzeug 12 steht, dessen Fahrwerk vermessen werden soll. Auf dem Meßplatz 10 sind vier Meßgeräte, ortsfest angeordnet, von den drei  
15 Meßgeräten 14, 16, 18 gezeigt sind, während das vierte Meßgerät durch das Kraftfahrzeug verdeckt ist. Figur 10 zeigt einen Meßplatz 20, mit dem Kraftfahrzeug 12, wobei wiederum drei Meßgeräte 24, 26, 28 gezeigt sind, während das vierte Meßgerät durch das Kraftfahrzeug verdeckt ist.

Die Meßgeräte 14, 16, 18 umfassen jeweils eine Bodenplatte 30 und zwei Kameras 32, 34, die  
20 unter unterschiedlichen Winkeln zu dem zugehörigen Rad 36 des Kraftfahrzeugs 12 gerichtet sind. Bei dem Ausführungsbeispiel von Figur 9 sind die Meßgeräte 14, 16, 18 fest auf dem Meßplatz 10 montiert, wobei die relativen Winkellagen der Meßgeräte untereinander sowie deren Abstände bei der Montage festgestellt werden und dann unverändert bleiben.

Bei dem Ausführungsbeispiel von Figur 10 weisen die Meßgeräte 24, 26, 28 wiederum eine  
25 Bodenplatte 40 und zwei Kameras 42, 44 auf, die unter unterschiedlichen Winkeln auf das zugehörige Rad 36 gerichtet sind. Auf den Grundplatten 40, 46, 48 der Meßgeräte 24, 26, 28 sind Bezugssystem-Meßköpfe 50, 52, 54 vorgesehen, die eine optische Vermessung der relativen Winkellagen und der Abstände der Meßgeräte 24, 26, 28 (und des durch das Kraftfahrzeug 12 verdeckten Meßgeräts) gestatten. Dazu hat jeder Meßkopf, wie beispielsweise der Meßkopf 50 zwei Sende/Empfangseinheiten  
30 56, 58, die zu dem in Längsrichtung des Fahrzeuges gegenüberliegenden Meßkopf beziehungsweise zu den quer zu dem Fahrzeug gegenüberliegenden Meßkopf gerichtet sind. Mit einem derartigen Bezugsmesssystem genügt eine grob justierte Aufstellung der Meßgeräte 24, 26, 28, und die genaue Bestimmung der relativen Lagen und der Abstände der Meßgeräte zueinander kann laufend gemessen und auch nachjustiert werden.

Die Kalibrierung des Stereo-Meßsystems umfaßt die Kalibrierung der „Inneren Kameraparameter“ und die Kalibrierung der Einbausituation der Meßgeräte. Als „innere Parameter“ werden alle Parameter bezeichnet, die kameraspezifisch sind, d.h. durch den Zusammenbau der Kamera festgelegt sind. Innere Parameter werden festgelegt durch die Einbaulage des optischen Sensors, das Objektiv und dessen Einbaulage, die Blendeneinstellung und Fokuseinstellung. Bei Zoom-Objektiven ist zudem die eingestellte Brennweite entscheidend. Die inneren Parameter können so lange als konstant angesehen werden, wie keine mechanische Veränderung an der Kamera oder Änderung der Objektiveneinstellung vorgenommen wird. Die Parameter werden mit Hilfe von vollständig bekannten Objekten bestimmt. Vorzugsweise derzeit die Kalibrierung mit einem 3D-Objekt, wie z.B. einer mit ausreichend vielen markanten Punkten versehenen Anordnung planarer Targets in verschiedenen Raumlagen.

Die Kalibrierung der Einbausituation beim Zusammenbau zweier Kameras in einem Meßgerät zu einem Stereo-Meßsystem muss bezogen auf das Koordinatensystem des Meßgeräts erfolgen. Dazu werden an dem Meßgerät entsprechende Steckachsen, Anlageflächen und/oder Indexstifte vorgesehen, bezüglich denen sowohl das eingebaute Bezugsmeßsystem als auch das Stereomeßsystem kalibriert werden können. Alternativ kann eine optische Kalibrierung vorgenommen werden.

Die Qualität der Beleuchtung wird anhand der vorhandenen Meßbilder überprüft. Dabei wird auf ausreichende Segmentierbarkeit, d.h. die Qualität des Kontrasts der Schattengrenze geprüft. Ist keine ausreichende Segmentierbarkeit gegeben, wird die Beleuchtung nachgestellt.

Die Messung der Bezugssystem-/Referenzsystem-Daten ist mit Ausnahme der Abstandsmessung identisch mit dem Verfahren bei den sich bekannten Fahrwerkvermessungssystemen. Ergebnisse der Messung des Bezugssystems sind die Lage der einzelner Meßgeräte zueinander, einschließlich Abstand, und die Lage der einzelner Meßgeräte zur Senkrechten. Die Abstandsmessung wird über die Winkelmessung zweier lichtemittierenden Dioden (LED's) mit bekanntem Abstand vorgenommen.

## 25 Ablauf der Messungen

Figur 11 zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm der Messung, wobei davon ausgegangen wird, dass die oben genannten Messungen des Bezugssystems und die Kalibrierung der Meßgeräte abgeschlossen ist. Im Schritt 60 wird die Messung gestartet. Neben Schritt 62 werden die Messungen der einzelner Meßgeräte 14, 16, 18 beziehungsweise 24, 26, 28 durchgeführt, wobei die Meßergebnisse in den Schritten 64, 66 in einem Rechner (nicht gezeigt) eingelesen werden. Der Rechner bestimmt in dem Schritt 68 die Transformationsmatrix aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung (BM-Ergebnisse), das heißt aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung. In dem Schritt 70 werden die Ergebnisvektoren der Stereomessung der Meßgeräte (MK) in das Rechenkoordinatensystems über Versatzwinkel und Abstände aus dem Bezugsmeßsystem (RKS-Achsen) transformiert, wobei ein Koor-

dinatensystem der Meßgeräte als Rechenkoordinatensystem willkürlich festgelegt wird. In dem Schritt 74 bestimmt dann der Rechner die Radstellungswerte im Raum, das heißt insbesondere die einzelnen Spurwinkel der Vorderräder, der Gesamtspurwinkel der Vorderräder, die sogenannte geometrische Fahrachse und dergleichen, wie es bei herkömmlichen Fahrwerkvermessungseinrichtungen üblich ist. Dabei wird die Stellung der Ergebnisvektoren zueinander in dem Rechenkoordinatensystem ausgewertet, und daraus werden die entsprechenden Fahrwerkmesswerte berechnet. In dem Schritt 76 werden schließlich die Ergebnisse zu den Radstellungswerten, nämlich Sturz, Spur und von der Spur abgeleitete Winkelwerte an eine Anzeigeeinrichtung übergeben und/oder zur weiteren Verwendung gespeichert.

10           Figur 12 zeigt ein Ablaufdiagramm der Messungen in einem Meßgerät in etwas größerem Detail. In dem Schritt 80 wird ein Startsignal für die Messung gegeben. Darauf wird im Schritt 82 die Bildaufnahme gestartet, wobei zunächst in Schritt 84 überprüft wird, ob die Beleuchtung für die Messung ausreichend ist, und gegebenenfalls wird die Beleuchtung nachgestellt. Die Nachstellung kann eine größere oder geringere Helligkeit des Lichtes für die Beleuchtung umfassen, wobei jedenfalls das Ziel  
15   darin besteht, einen möglichst guten Kontrast des von den Kameras beobachteten Teils der Felge beziehungsweise des Felgenhorns zu erhalten. In dem Schritt 86 sind die Kameras, die rechts beziehungsweise links im Bezug auf die Radachse angeordnet sind, aktiv und dienen sowohl zur Überprüfung der Beleuchtungssituation als auch, nach abgeschlossener Einstellung der Beleuchtung, zur Aufnahme der Stereobilder der Radfelge. Im Schritt 88 erfolgt eine Segmentierung der Felge, wobei im  
20   Schritt 90 eine Segmentierung des Ventils des Kraftfahrzeugrades erfolgt, das heißt die Winkellage des Ventils wird festgestellt. Die Schritte 92 bis 98 dienen der Segmentierung des Felgenrandes, wobei im Schritt 92 eine Vorsegmentierung, im Schritt 94 eine Feinsegmentierung, im Schritt 96 eine Subpixelsegmentierung und im Schritt 98 eine Bestimmung der realen Felgenrandkontur unter Berücksichtigung von Modelannahmen stattfindet. Diese Segmentierung wird vorgenommen, um bestimmte Winkelbereiche des Felgenrandes auszumessen und die gemessenen Werte bei der Ermittlung der Felgenrandebene berücksichtigen zu können.

          Im Schritt 100 werden die bisherigen Meßergebnisse unter Berücksichtigung der inneren Kameraparameter umgerechnet, um in dem Schritt 102 optische Verzerrungen bei der Bestimmung der Lage des charakteristischen Merkmals (z.B. des Ventils) und in dem Schritt 104 optische Verzerrungen  
30   im Bezug auf die Bilder des Felgenrandes zu eliminieren. Im Schritt 106 werden unter Berücksichtigung der äußeren Kameraparameter im Schritt 108 die 3D-Lage des Ventils rekonstruiert und in dem Schritt 110 die Lage des Felgenrandes rekonstruiert. Das Resultat des Schritts 108 ist die Information über die 3D-Position des Ventils (Schritt 112). Zur Felgenrandrekonstruktion wird zunächst im Schritt 114 eine erste Approximation der Felgenrandebene durchgeführt. Sodann wird in dem Schritt 116 das Winkelar-

gument berechnet, und in dem Schritt 118 erfolgt eine Torusmodelladaptation beziehungsweise die endgültige Bestimmung der Felgenreandebene. Im Schritt 120 wird das Ergebnis der Berechnung, nämlich der Normalenvektor und der Mittelpunkt der Felgenreandebene, angezeigt und/oder für die weitere Verrechnung gespeichert. Die in den Schritten 112 und 120 festgehaltenen Ergebnisse werden  
5 dann zur Berechnung der Radstellungswinkelwerte weiter verarbeitet, wie unter Bezugnahme auf Figur 11 in den Schritten 68 bis 76 beschrieben wurde.

Figur 13 zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm für die Fortsetzung des in Figur 12 gezeigten Verfahrens zum Zwecke der Felgenschlagkompensation. Zur Felgenschlagkompensation im Schritt 122 werden die in den Schritten 112 und 120 (Figur 12) erhaltenen Ergebnisse über die 3D-  
10 Position des charakteristischen Merkmals, z.B. des Ventils, beziehungsweise den normalen Vektor und den Mittelpunkt der Felgenreandebene berücksichtigt, um einen Parametersatz „Rotationsachse“, das heißt die wahre Rotationsachse in Bezug auf den normalen Vektor und die Ventilstellung in Kugelkoordinaten zu erhalten. Die Messung der Raddrehung wird bei der Durchführung und Überwachung der Felgenschlagkompensation, bei der Bestimmung der Spreizung im Rahmen einer Einschlagver-  
15 messung und bei der Bestimmung der Nachlaufänderung bei der Nachlaufeinstellung benötigt. Für die Durchführung und Überwachung der Felgenschlagkompensation ist eine geringere Meßgenauigkeit erforderlich. Eine Auflösung der Raddrehung auf ca. 10 Winkelminuten ist ausreichend. Zudem sollte eine beliebige Drehung des Rades erkannt werden können, wozu die Verfolgung und Vermessung des Ventils ausreicht. Das Ventil ist einzigartig am Umfang und kann mit entsprechender Genauigkeit loka-  
20 lisiert werden.

Zur Bestimmung der Spreizung im Rahmen einer Einschlagvermessung und der Bestimmung der Nachlaufänderung bei der Nachlaufeinstellung ist die Raddrehung mit einer Genauigkeit von mindestens 2 Winkelminuten zu bestimmen. Allerdings muss keine beliebige Drehung des Rades gemessen werden können. Dazu kann die Bestimmung der 3D-Position des Ventils durchgeführt werden.  
25 Alternative kann die Vermessung und Verfolgung von nicht rotierenden Kanten beziehungsweise Strukturen oder Merkmalen in der Felge durchgeführt werden, wobei entsprechende Algorithmen wie zur Felgenreandbestimmung zur Anwendung kommen können.

Figur 14 zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm zur Berechnung der Spur- und Sturzwinkel aus den Ergebnissen der Schritte 112 und 120 der Figur 12 und dem Schritt 124 von Figur 13, d.h. die  
30 Endgültige Berechnung der Spur- und Sturzwinkel unter Berücksichtigung des Felgenschlags. Mit anderen Worten wird die Information über die 3D-Position des Ventils und die Information über den normalen Vektor und den Mittelpunkt der Felgenreandebene sowie der Parametersatz „Rotationsachse“ im Schritt 126 zur Lagebestimmung der Rotationsachse verwendet. Das Ergebnis des Schritts 126 wird in dem Schritt 128 in das Referenzkoordinatensystem des Rechners transformiert, der daraufhin im Schritt

130 die Spur- und Sturzwinkel berechnet.

Im Folgenden werden die Berechnungsgrundlagen für die Berechnung der Fahrwerkparameter beschrieben.

## 5 Begriffe:

BM	Bezugsmesssystem	Derzeit vorhandenes Standard-Winkelmesssystem mit eigenem Koordinatensystem.
BM <sub>i</sub>		Mehrere an entsprechenden Rädern positionierte Bezugsmesssysteme.
KMK	Koordinatensystem MK	Rechtwinkliges Rechtssystem. Ursprung in Spur-LED der Kamera 2 des BM. x-Richtg.: längs BM (nicht Fahrtrichtung) y-Richtg.: Steckachsenaufnahme BM – Rad z-Richtg.: entgegen Erdschwerkraft Gekennzeichnet durch Apostroph.
KMK <sub>i</sub>		Koordinatensysteme der entsprechenden Messköpfe MK <sub>i</sub> .
RKS	Rechen-Koordinatensystem	Willkürlich aber sinnvoll festgelegtes Koordinatensystem zur Verrechnung aller MK zu einer Fahrwerkvermessung.
i = 1...x		Die Nummerierung 1...x der einzelnen System erfolgt entsprechend der derzeitigen Konvention für Messwertaufnehmer.

## Meß- und Rechengrößen:

d <sub>v</sub>	Abstand MK's Querspur vorne
d <sub>h</sub>	Abstand MK's hinten
d <sub>l</sub>	Abstand MK's links
d <sub>r</sub>	Abstand MK's rechts
A, B, C, D, E, F, G, H	Spurwinkel des Bezugssystems
I, K, L, M, N, O, P, Q	Neigungswinkel des Bezugssystems
(x', y', z')	Vektor im KMK (Koordinatensystem Meßgerät)
(x'', y'', z'')	Vektor parallel zum RKS (Rechen-Koordinatensystem)
(x, y, z)	Vektor im RKS (Rechen-Koordinatensystem)
x <sub>n</sub> , y <sub>n</sub> , z <sub>n</sub> )	Richtungsvektor der Radachse radauswärts

## Ergebnisvektor

- 10 Das Einzel-Stereo-Messsystem i hat folgenden Ergebnisvektor im Koordinatensystem des Meßgerät (Meßsskopf) i (KMK<sub>i</sub>).

$$\vec{e}'_i = \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} * \lambda_i \begin{pmatrix} x'_{in} \\ y'_{in} \\ z'_{in} \end{pmatrix};$$

## Transformation in das RKS

Die Ergebnisvektoren werden mit Hilfe der Ergebnisse aus dem Bezugssystem in das Rechenkoordinatensystem transformiert.

5

## Schritt 1:

Transformation der Ergebnisvektoren in ein horizontiertes Koordinatensystem und in ein Koordinatensystem, das in allen Richtungen parallel zum RKS liegt.

10 Zusammengesetzte Rotation vom Typ Cardan:

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = R_z(\tau) R_y(\kappa) R_x(\gamma) \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix};$$

## Schritt 2:

Verschiebung der Anfangspunkte der Vektoren in das RKS.

15 Dabei werden folgende Versatzwinkel definiert:

Festlegung  $KMK_4 = RKS$

Versatzwinkel  $KMK_2$  zu  $KMK_4$ :  $f_{24} = (F+D)/2$ ;

Versatzwinkel  $KMK_3$  zu  $KMK_4$ :  $f_{34} = (H+G)/2$ ;

Versatzwinkel  $KMK_1$  zu  $KMK_3$ :  $f_{13} = (E+C)/2$ ;

20 wobei.

C,E: gegenüberliegende Spursensoren links

D,F: gegenüberliegende Spursensoren rechts

G,H: gegenüberliegende Spursensoren hinten

25 Verschiebung  $KMK_2$  in RKS

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2'' \\ y_2'' \\ z_2'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_r * \cos(\varphi_{24}) \\ d_r * \sin(\varphi_{24}) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3'' \\ y_3'' \\ z_3'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -d_h * \sin(\varphi_{34}) \\ d_h * \cos(\varphi_{34}) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w * (\cos(\tau_3) - 1) \\ w * \sin(\tau_3) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Verschiebung KMK<sub>1</sub> in RKS

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1'' \\ y_1'' \\ z_1'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_l * \cos(\varphi_{13}) \\ d_l * \sin(\varphi_{13}) \\ 0 \end{pmatrix};$$

5

Die vorstehende Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung wurde zum Zweck der Erläuterung gegeben. Die Erfindung ist nicht auf die offenbarten Ausführungsbeispiele beschränkt. Viele Möglichkeiten und Veränderungen der Ausführungsbeispiele sind für einen Fachmann in Bezug der vorstehende Offenbarung ersichtlich, und der Schutzzumfang der Erfindung wird nur  
10 durch die beigefügten Ansprüche definiert.

1. Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, umfassend:
- 5 Bereitstellen eines Modells, das einen Modellkörper eines lokalisierbares Radfelgen-Geometriedetail sowie die räumliche Lage des Modellkörpers zu dem Meßgerät durch Modellparameter beschreibt,
- Erfassen eines Bildes des Radfelgen-Geometriedetails der Radfelge mit der Kamera,
- Anpassen der aus den Modellparametern resultierenden Abbildung des Modellkörpers an das
- 10 Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells, und
- Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells beim Anpassen, wobei die Daten bezüglich der Lage des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails die räumliche Lage des Radfelgen-Geometriedetails und damit der Radfelge selbst wiedergeben, wenn die aus den Modellparametern resultierende Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem
- 15 erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen übereinstimmt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Modellkörper ein sogenannter Schmiegetorus oder eine 3D-CAD-Darstellung ist.
- 20
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass im Falle des Schmiegetorus Modellparameter des Modells ein Hauptradius  $R$  und ein Nebenradius  $r$  des Torus, eine Position  $c$  des Toruszentrum, ein Normalenvektor  $n$  der Rotationsebene des Torus und eine Position  $p$  des Projektionszentrum einer Lochkamera sind, mit der der Schmiegetorus betrachtet wird.
- 25
4. Verfahren nach einer der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Radfelgen-Geometriedetail die Schattengrenze der Felgenreandkontur ist.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass
- 30 die Schattengrenze von der wenigstens einen Kamera erfasst wird; dass aus der Schattengrenze eine extremale Schattengrenzkurve berechnet wird,; dass aus der extremale Schattengrenzkurve über eine orthogonale Projektion eine Achse berechnet wird, die senkrecht auf einer von der Radfelge aufgespannten Ebene steht, womit die Lage der Radfelge im Raum bestimmt ist.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Radfelgenkontur mit zwei Kameras erfasst wird, die unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind.
- 5 7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Bild der Radfelge zur Bestimmung eines Drehwinkel-Bezugspunktes an der Felge verwendet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung des Drehwinkel-Bezugspunktes an der Felge die Lage eines charakteristischen Merkmals auf dem Rad verwendet wird.
- 10 9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass als charakteristisches Merkmal zur Bestimmung des Drehwinkel-Bezugspunktes ein charakteristisches Merkmal der Felge verwendet wird.
- 15 10. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass als charakteristisches Merkmal zur Bestimmung des Drehwinkel-Bezugspunktes ein Ventil des Rades verwendet wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass zur Segmentierung des Felgenumfangs eine Vorsegmentierung und eine Feinsegmentierung durchgeführt wird.
- 20 12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur Vorsegmentierung und Feinsegmentierung eine Subpixelsegmentierung durchgeführt wird.
13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Anpassen der Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch  
25 Verändern von Modellparametern des Modells dadurch erfolgt, dass zunächst eine Approximation einer Felgenrandebene, dann eine Winkelargumentberechnung und schließlich eine endgültige Torusmodellanpassung an die finale Felgenrandebene durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Daten bezüglich der Modellpa-  
30 rameter des Modells, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn die Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, ausgegeben oder angezeigt werden.
15. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

- Starten der Bildaufnahme;
- Segmentierung der Felge, wobei eine Segmentierung des Ventils des Kraftfahrzeugrades erfolgt;
- Segmentierung des Felgenrandes; um vorgegebene Winkelbereiche des Felgenrandes aus-
- 5 zumessen;
- Rekonstruktion der 3D-Lage des Felgenrandes;
- Anzeigen des Ergebnisses der Berechnung, nämlich des Normalenvektors und des Zentrumspunkt der Felgenrandebene und/oder Speichern derselben für die weitere Verrechnung.
- 10 16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Lage eines charakteristischen Merkmals unter Berücksichtigung der äußeren Kameraparameter rekonstruiert wird, um einen Parametersatz "Rotationsachse", das heisst, die wahre Rotationsachse in Bezug auf den normalen Vektor zu erhalten.
- 15 17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Starten der Bildaufnahme zunächst überprüft wird, ob die Beleuchtung für die Messung ausreichend ist, und dass die Beleuchtung entsprechend nachgestellt wird.
18. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Nachstellung eine
- 20 größere oder geringere Helligkeit des Lichtes für die Beleuchtung umfasst
19. Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu dem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, gekennzeichnet durch einen Rechner, der programmiert ist, um das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 durchzu-
- 25 führen.
20. Meßgerät nach Anspruch 19 zur Durchführung des Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Kameras vorgesehen sind, die das perspektivische Bild der Radfelgenkontur erfassen und unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind.
- 30 21. Meßgerät nach Anspruch 19 dadurch gekennzeichnet, dass es je Kamera einen optischen Sensor, eine Objektiv, eine Blendenstelleinrichtung und eine Fokusstelleinrichtung umfasst, und dass die Einbaulage des Sensors und des Objektivs, die Blendeneinstellung und Fokuseinstellung vorjustiert sind.

22. Meßgerät nach Anspruch 20 dadurch gekennzeichnet, dass bei Zoom-Objektiven zudem die eingestellte Brennweite vorjustiert ist.

5 23. Meßgerät nach Anspruch 21 zur Durchführung des Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass eine Ausgabe- beziehungsweise Anzeigevorrichtung zum Ausgeben beziehungsweise Anzeigen der Daten bezüglich der Modellparameter des Modells des Radfelgen-Geometriedetails, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn der Modellkörper des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, vorgesehen ist.  
10

24. Verfahren zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche an den Rädern des Kraftfahrzeugs durchgeführt wird, dass  
15 die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen bestimmt werden, dass  
die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umgerechnet werden, und dass  
die Radstellungswerte ausgegeben oder angezeigt werden.  
20

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

25 26. Verfahren nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem bestimmt werden, das zwischen den Meßgeräten angeordnet ist.

27. Verfahren nach Anspruch 24, gekennzeichnet durch folgende Schritte:  
30 Durchführung der Messungen der einzelnen Meßgeräte;  
Einlesen der Meßergebnisse in einen Rechner;  
Berechnen der Transformationsmatrix aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung;  
Transformieren der Ergebnisvektoren der Meßgeräte in das Rechenkoordinatensystems über Versatzwinkel und Abstände aus dem Bezugsmeßsystem;

Bestimmen der Radstellungswerte in dem Rechenkoordinatensystem durch Auswertung der Stellung der Ergebnisvektoren zueinander zur Berechnung der entsprechenden Fahrwerkmeßwerte;

Übergeben der Ergebnisse zu den Radstellungswerten an eine Anzeigeeinrichtung und/oder Speichern derselben zur weiteren Verwendung.

5

28. Fahrwerkvermessungseinrichtung für Kraftfahrzeuge, gekennzeichnet durch Meßgeräte nach einem der Ansprüche, die auf einem Meßplatz derart positioniert sind, dass ein Meßgerät jeweils einem der Räder des Kraftfahrzeugs zugeordnet ist, wobei die relativen Positionen der Meßgeräte bei der Durchführung der Messungen bestimmt sind, einen Rechner, der die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umrechnet, und durch eine Anzeige/Ausgabeeinrichtung, die die Radstellungswerte ausgibt oder anzeigt.

29. Fahrwerkvermessungseinrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

30. Fahrwerkvermessungseinrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem bestimmt werden, das zwischen den Meßgeräten angeordnet ist.

31. Fahrwerkvermessungseinrichtung nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, dass beim Zusammenbau zweier Kameras in einem Meßgerät zu einem Stereo-Meßsystem die Kameras bezogen auf das Koordinatensystem des Meßgeräts kalibriert sind.

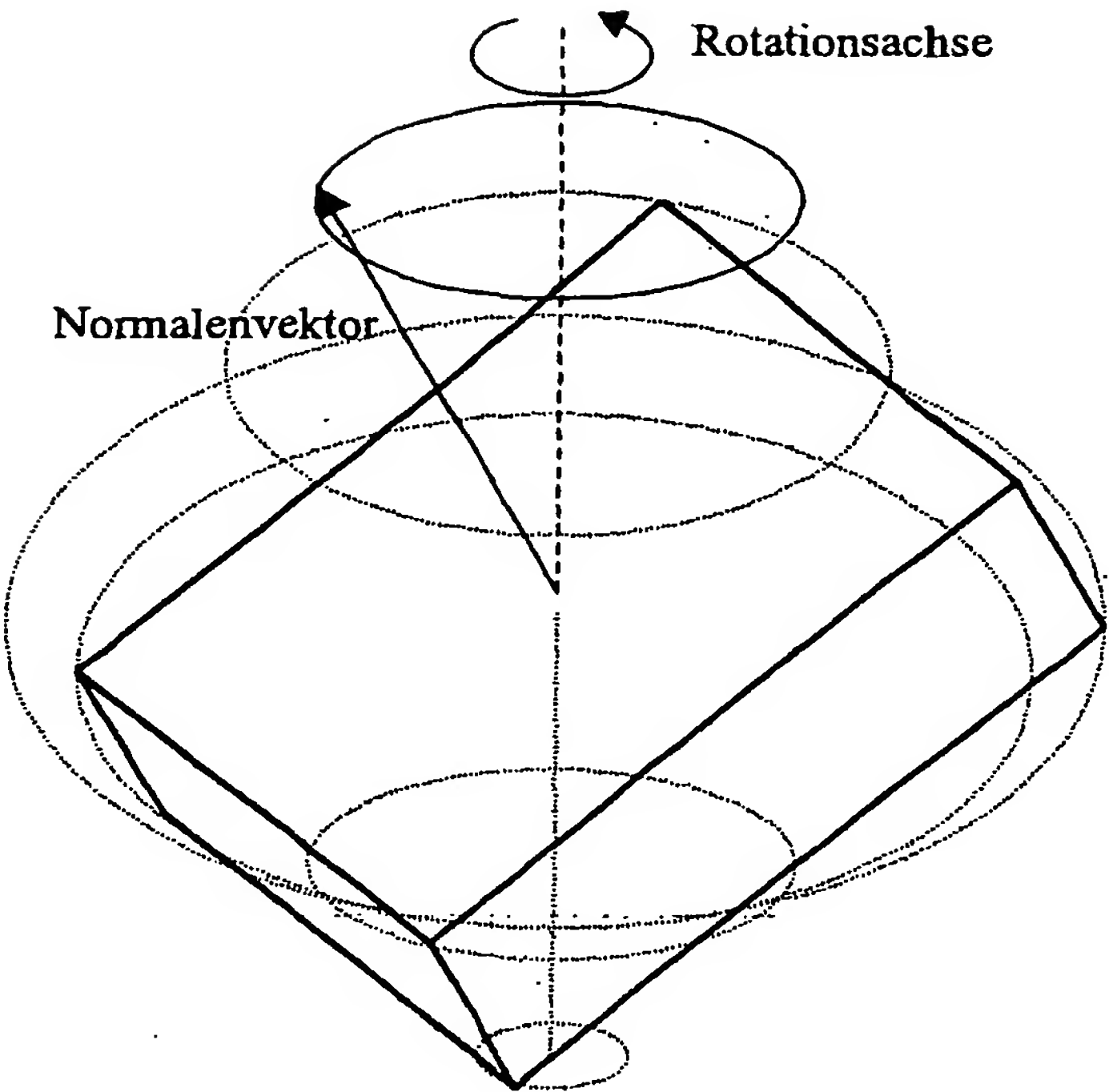


Fig: 1

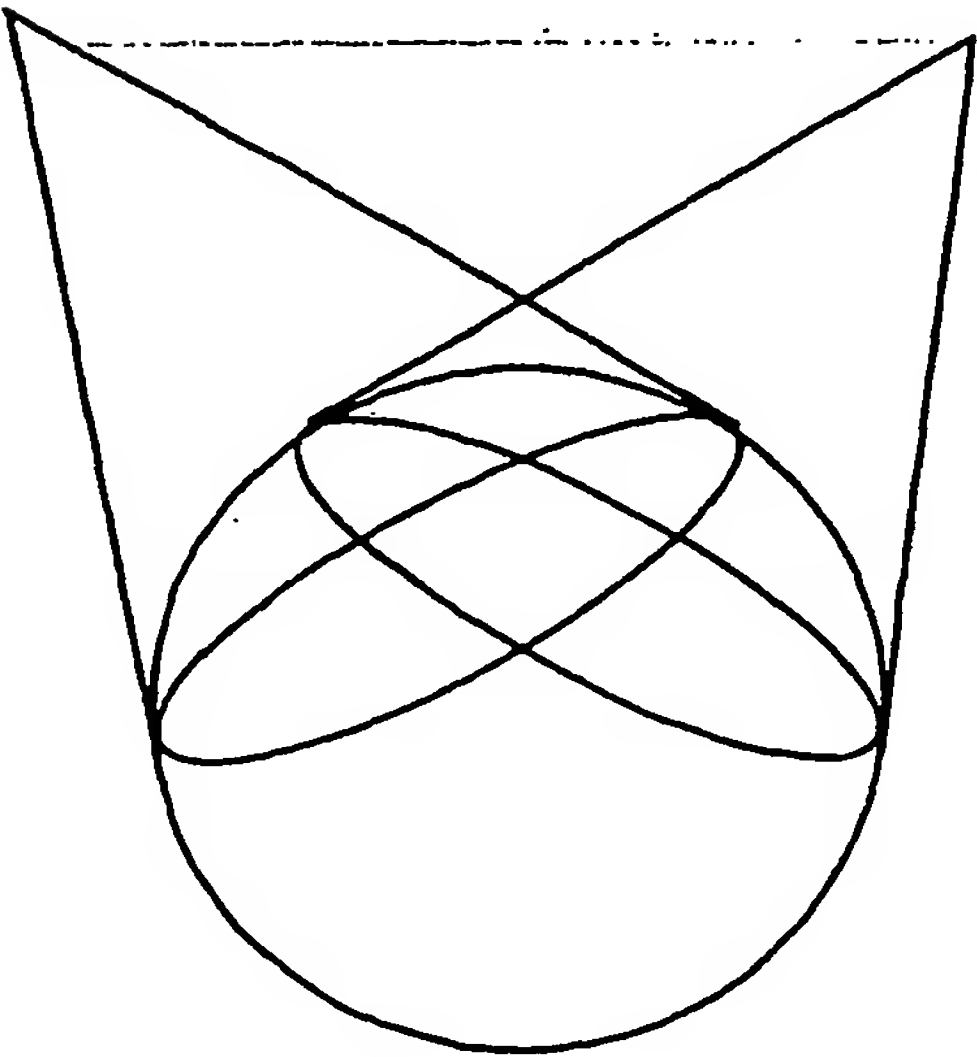


Fig: 2

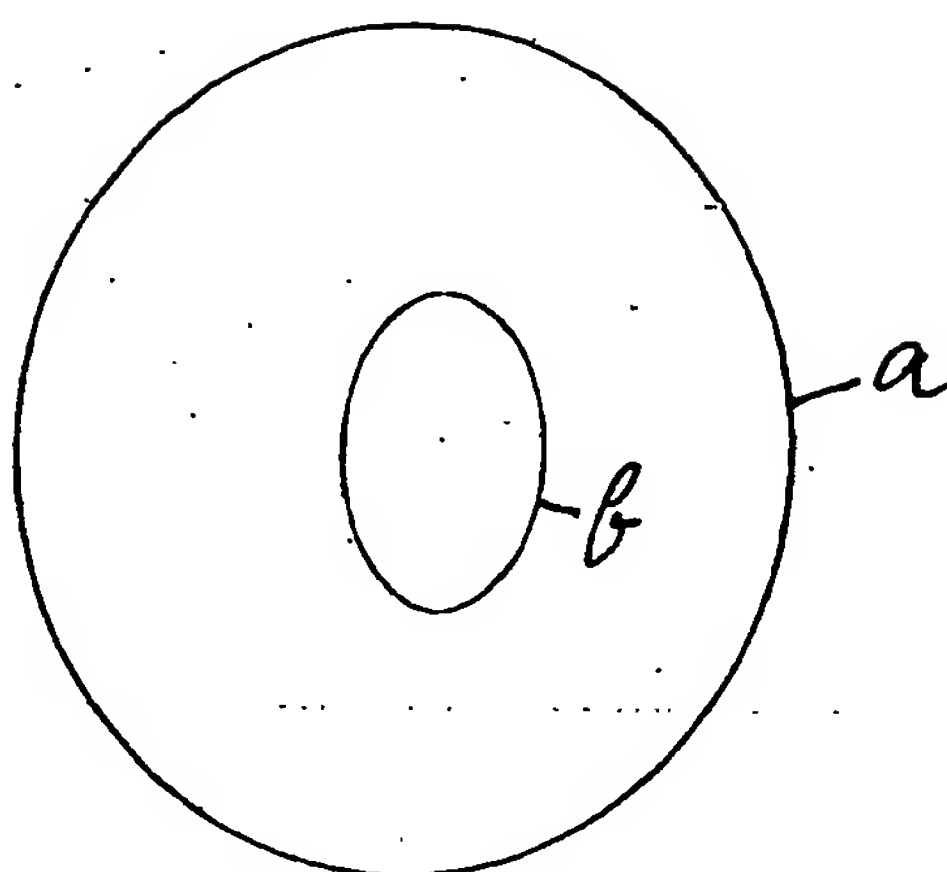


Fig: 3

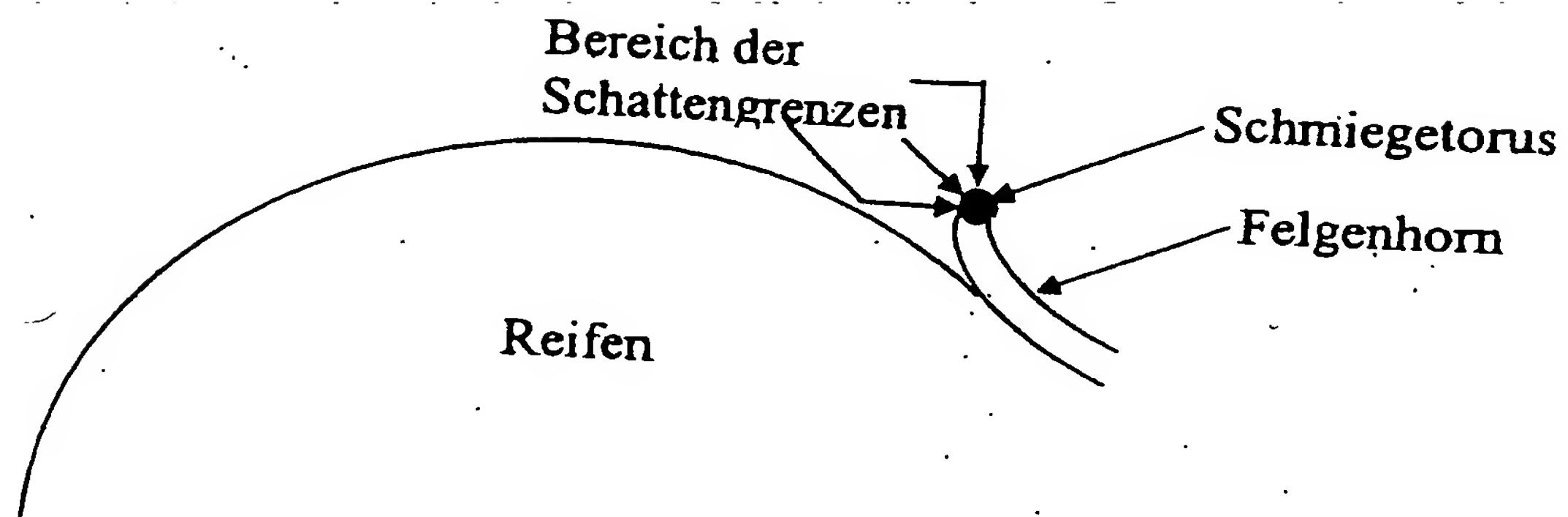


Fig: 4

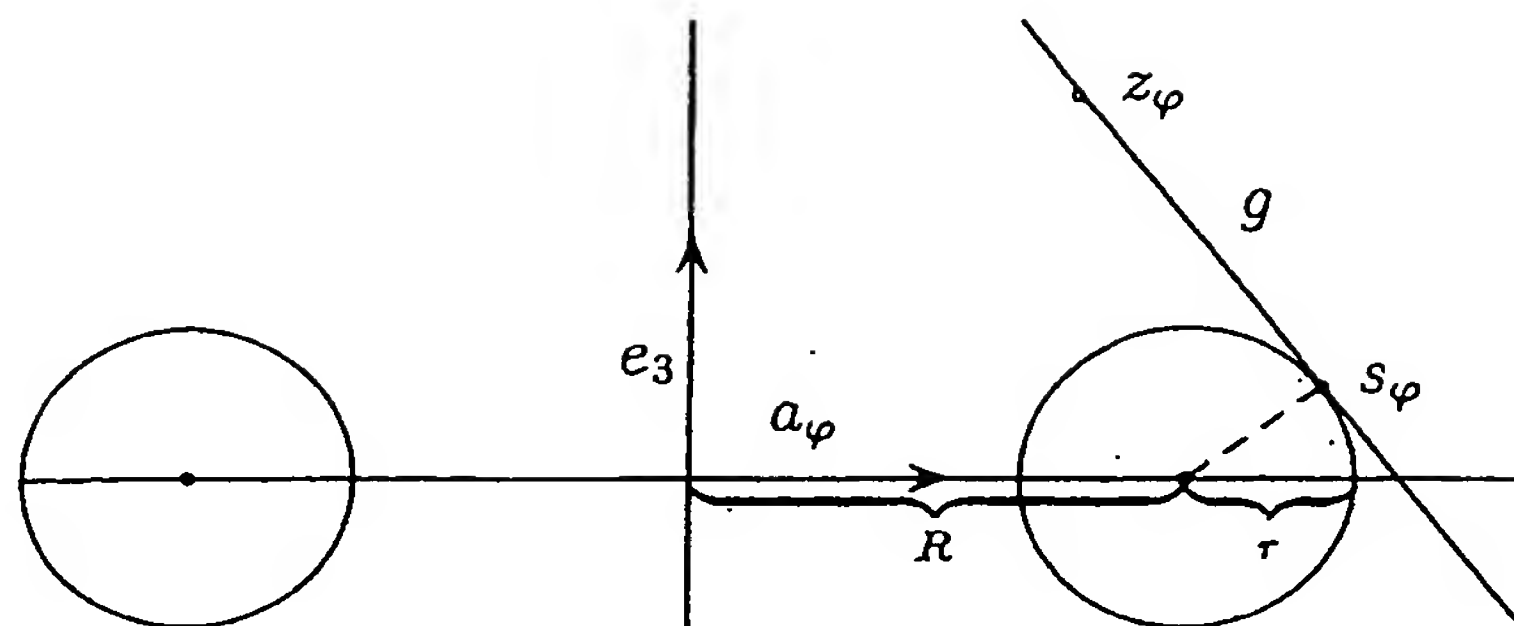


Fig: 5

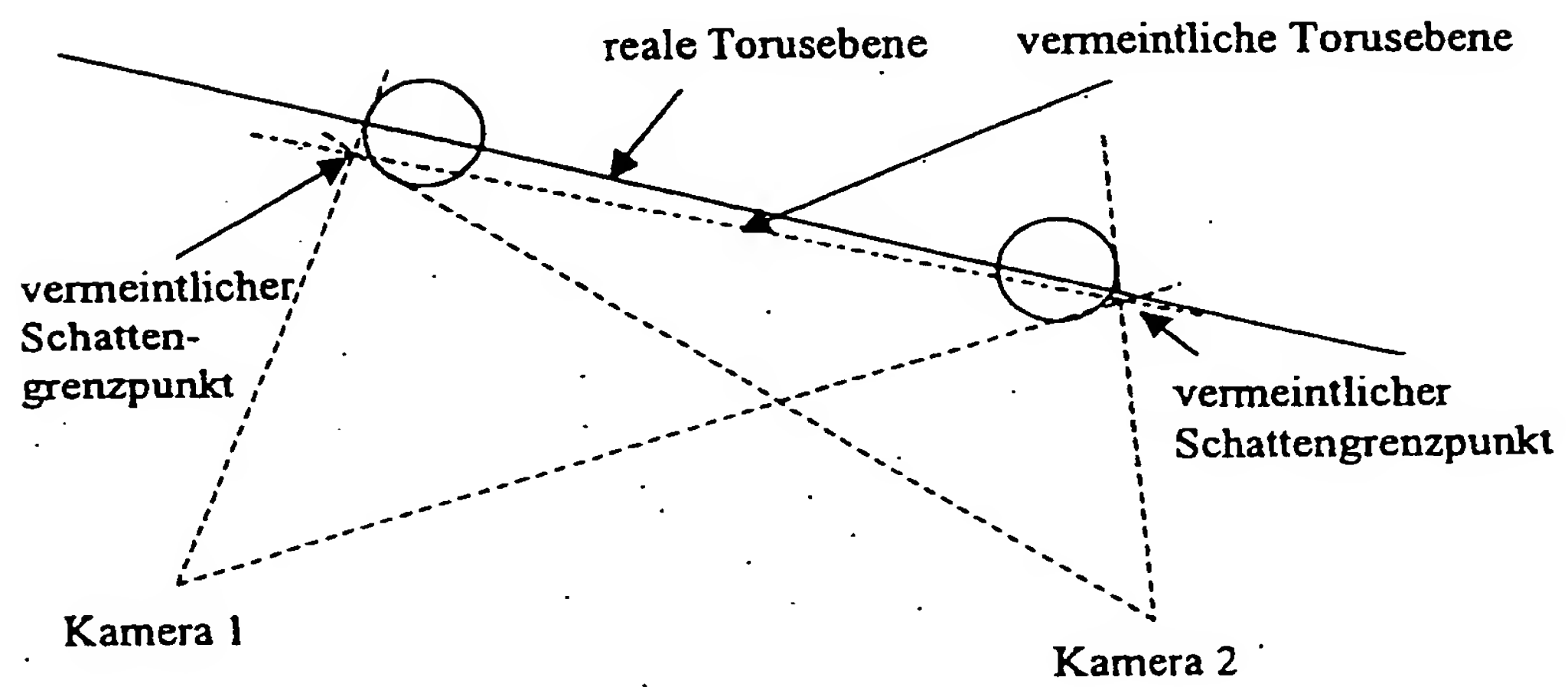
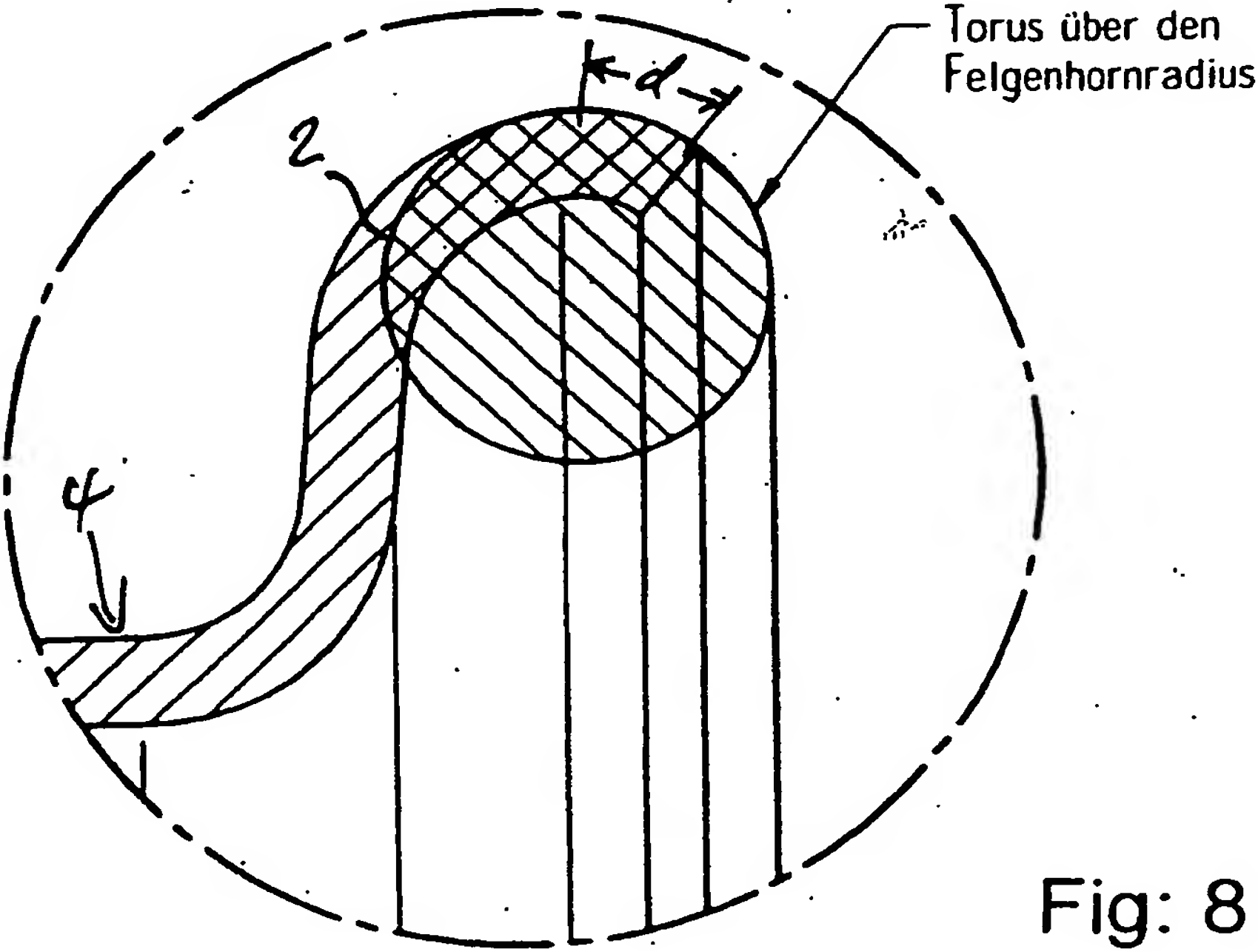
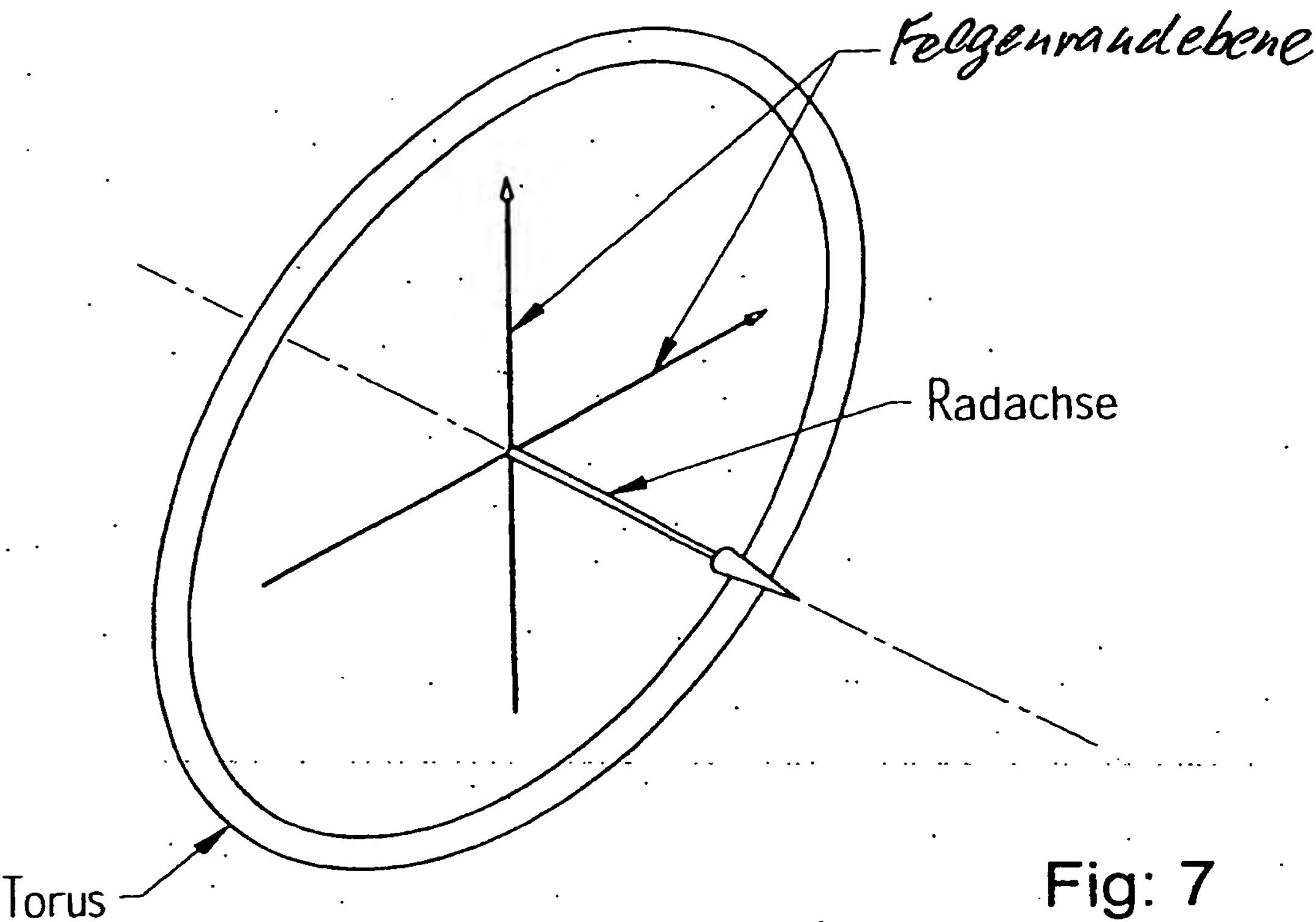


Fig: 6



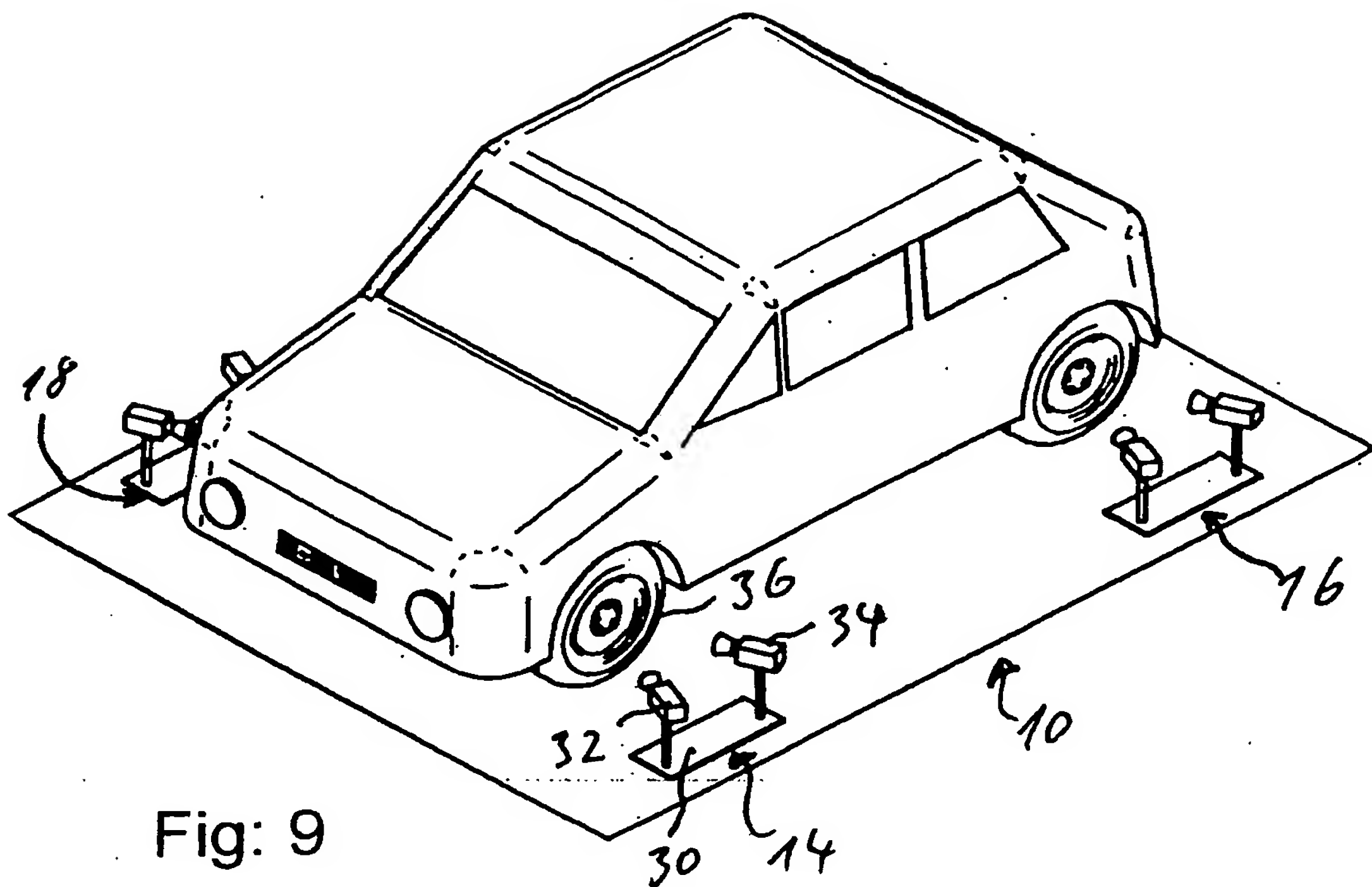


Fig: 9

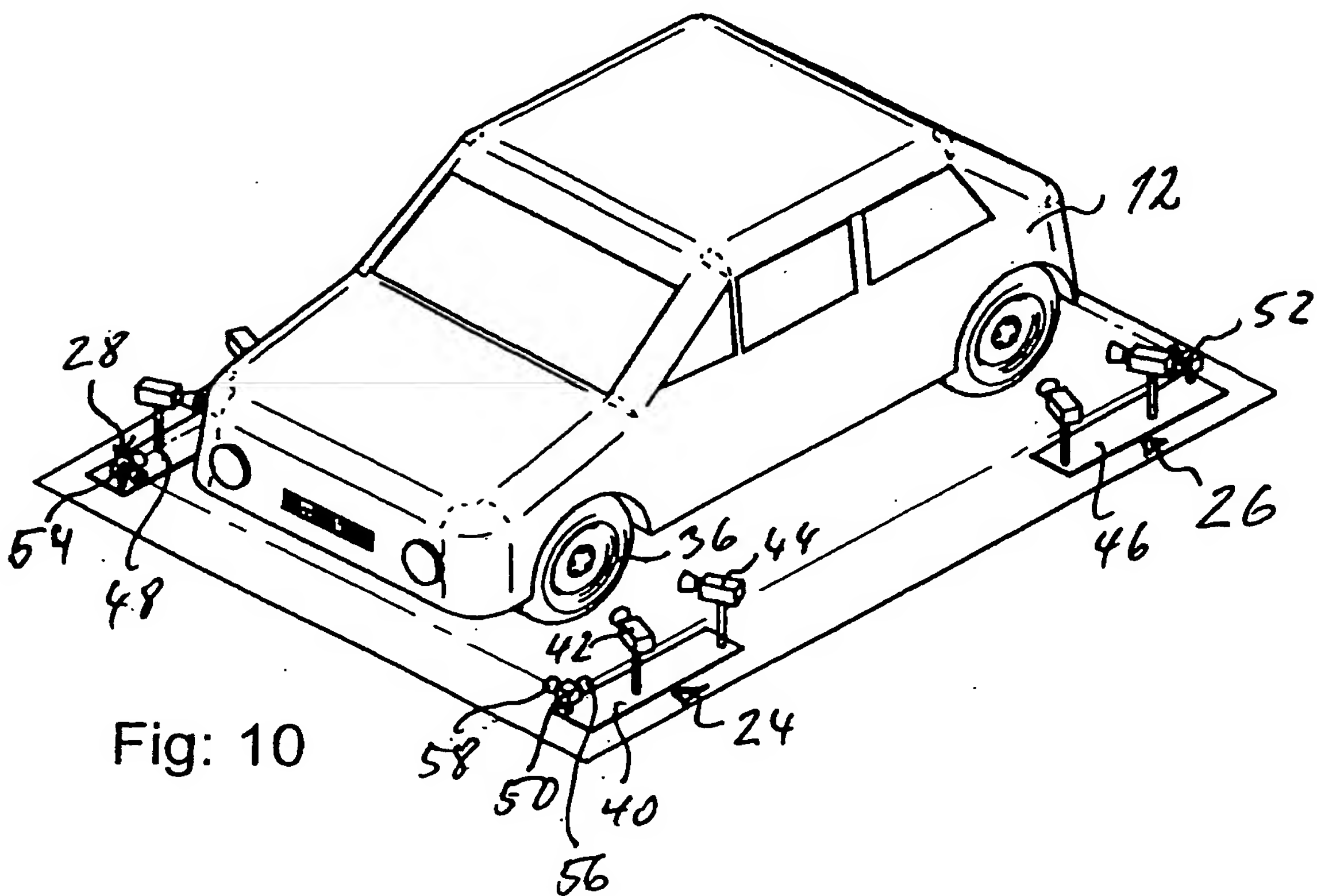


Fig: 10

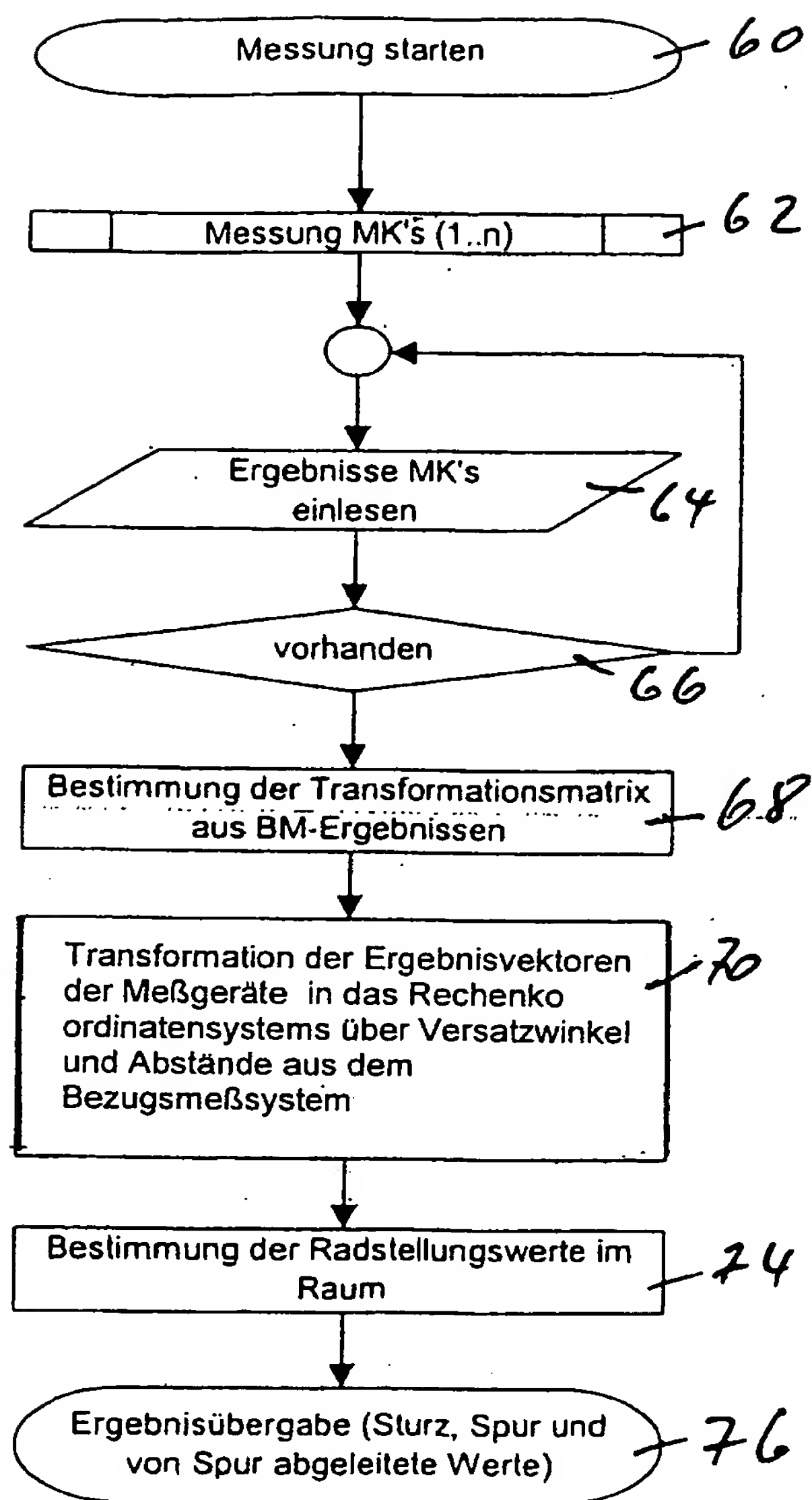


Fig: 11

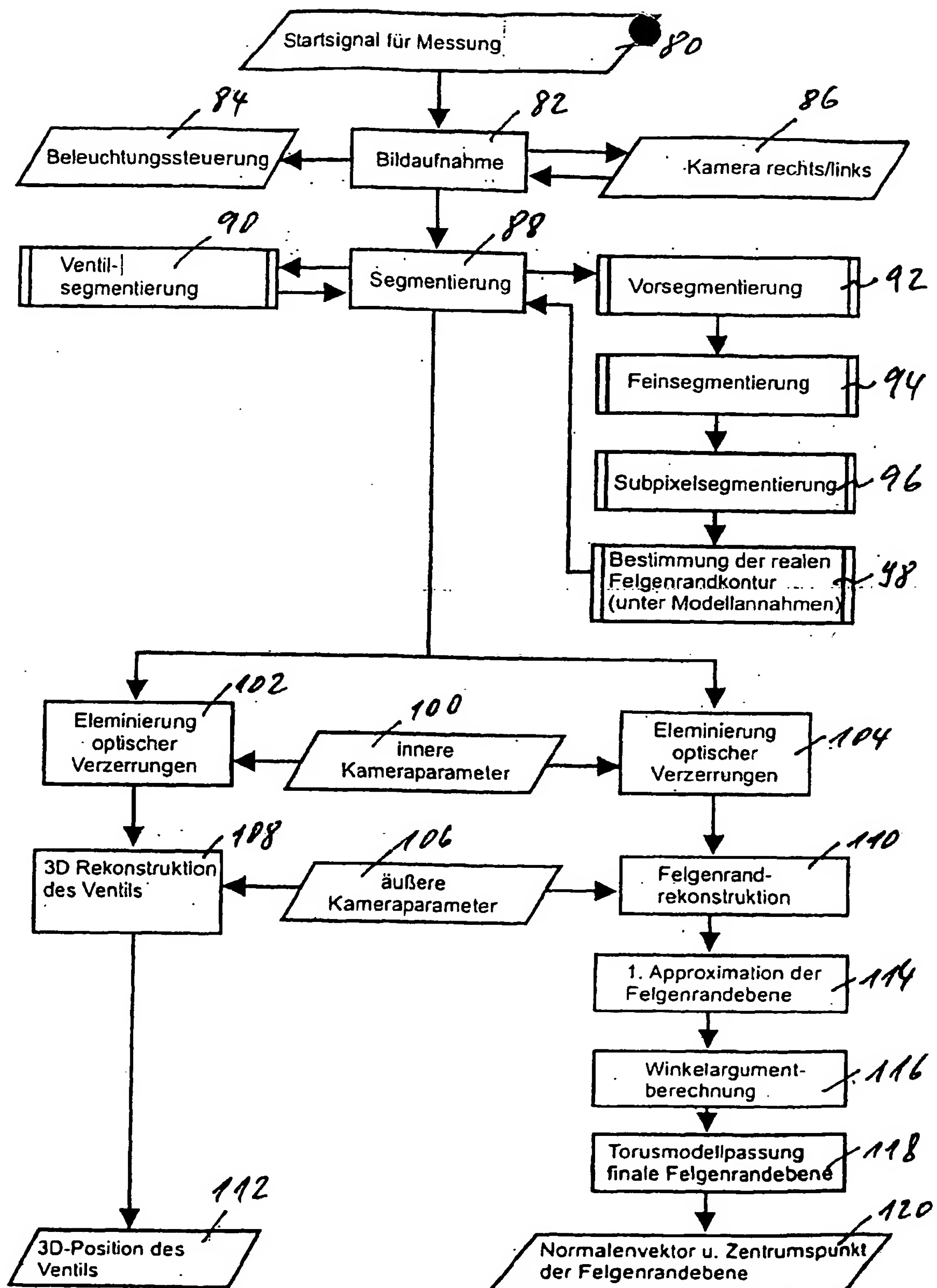
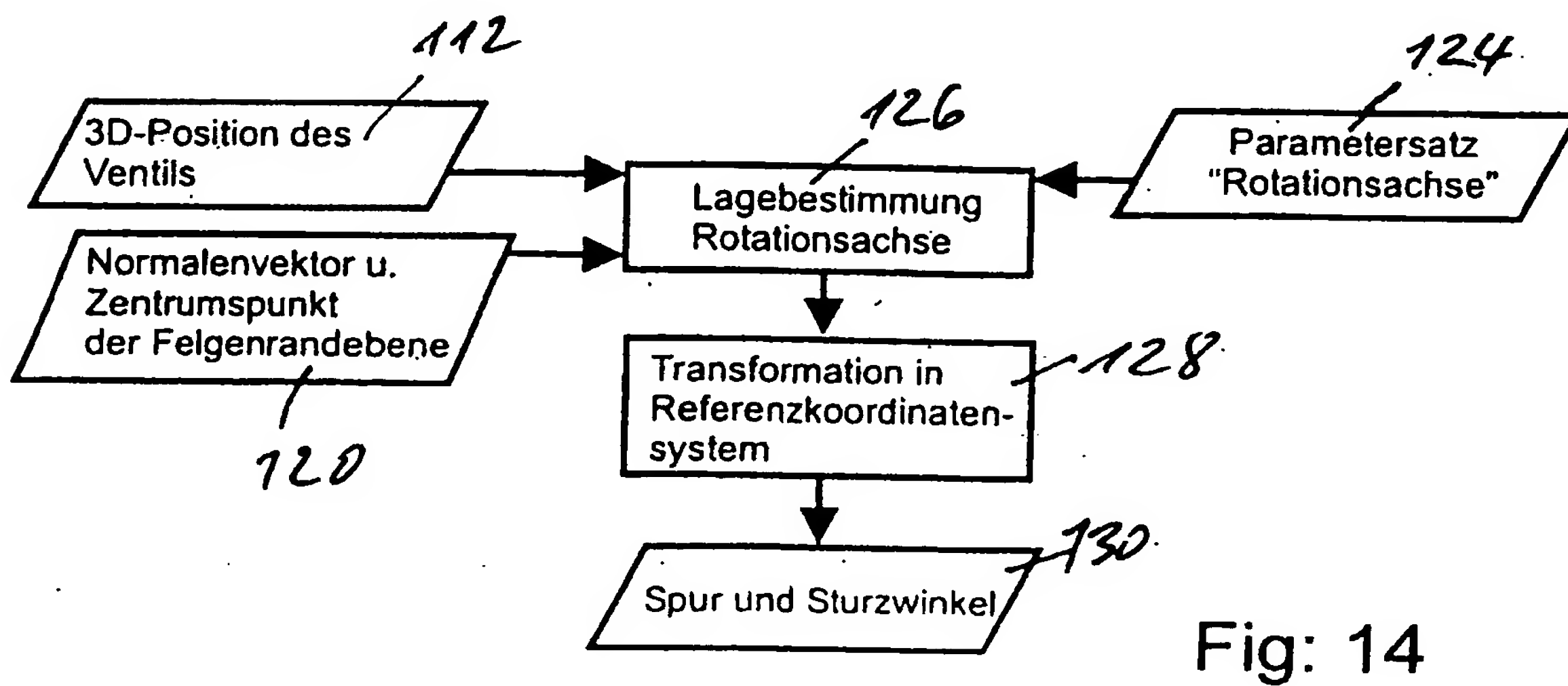
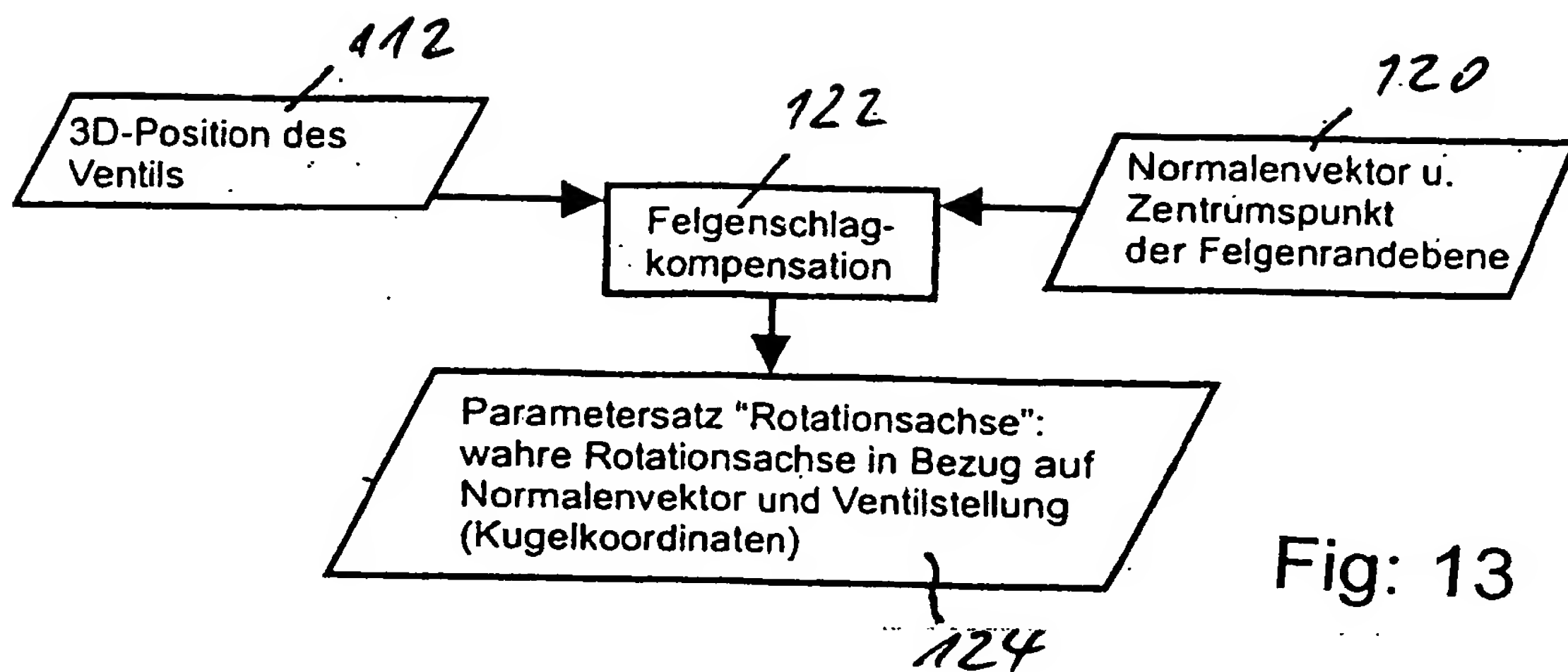


Fig: 12



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2005/002940

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01B11/275

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 895 056 A (CORGI S.P.A) 3 February 1999 (1999-02-03) column 3, line 56 - column 6, line 21; figures 1-11	1-31
A	US 6 323 776 B1 (JACKSON DAVID A ET AL) 27 November 2001 (2001-11-27) column 6, line 8 - column 10, line 55; figures 1-5	1-31
A	WO 01/77617 A (GIEFFE IMMOBILIARE S.N.C. DI GIANFRANCO CROSTA & C; COLOMBO, FLAVIO; R) 18 October 2001 (2001-10-18) page 6, line 31 - page 9, line 23; figure 1	1-31



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the International filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

8 June 2005

Date of mailing of the international search report

20/06/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Kunz, L

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/EP2005/002940

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 1 184 640 A (BEISSBARTH GMBH) 6 March 2002 (2002-03-06) cited in the application column 5, lines 13-21; figures 1-8 -----	24-31

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2005/002940

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
EP 0895056	A	03-02-1999	IT	RE970055 A1	01-02-1999
			EP	0895056 A2	03-02-1999
			JP	11152060 A	08-06-1999
			US	6341013 B1	22-01-2002
<hr/>					
US 6323776	B1	27-11-2001	AU	1817601 A	03-07-2001
			CA	2352188 A1	28-06-2001
			CN	1340179 A ,C	13-03-2002
			EP	1155384 A1	21-11-2001
			JP	2003520947 T	08-07-2003
			WO	0146909 A1	28-06-2001
<hr/>					
WO 0177617	A	18-10-2001	IT	MI20000806 A1	12-10-2001
			AU	4447301 A	23-10-2001
			EP	1281041 A1	05-02-2003
			WO	0177617 A1	18-10-2001
<hr/>					
EP 1184640	A	06-03-2002	DE	10043354 A1	14-03-2002
			EP	1184640 A2	06-03-2002
			US	2002080343 A1	27-06-2002
<hr/>					

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2005/002940

## A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 G01B11/275

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 G01B

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 0 895 056 A (CORGHI S.P.A) 3. Februar 1999 (1999-02-03) Spalte 3, Zeile 56 - Spalte 6, Zeile 21; Abbildungen 1-11	1-31
A	US 6 323 776 B1 (JACKSON DAVID A ET AL) 27. November 2001 (2001-11-27) Spalte 6, Zeile 8 - Spalte 10, Zeile 55; Abbildungen 1-5	1-31
A	WO 01/77617 A (GIEFFE IMMOBILIARE S.N.C. DI GIANFRANCO CROSTA & C; COLOMBO, FLAVIO; R) 18. Oktober 2001 (2001-10-18) Seite 6, Zeile 31 - Seite 9, Zeile 23; Abbildung 1	1-31
	----- -/--	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der Internationalen Recherche

8. Juni 2005

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

20/06/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Kunz, L

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP2005/002940

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 1 184 640 A (BEISSBARTH GMBH) 6. März 2002 (2002-03-06) in der Anmeldung erwähnt Spalte 5, Zeilen 13-21; Abbildungen 1-8 -----	24-31

# INTERNATIONALE RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2005/002940

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 0895056 A	03-02-1999	IT RE970055 A1	01-02-1999
		EP 0895056 A2	03-02-1999
		JP 11152060 A	08-06-1999
		US 6341013 B1	22-01-2002
US 6323776 B1	27-11-2001	AU 1817601 A	03-07-2001
		CA 2352188 A1	28-06-2001
		CN 1340179 A ,C	13-03-2002
		EP 1155384 A1	21-11-2001
		JP 2003520947 T	08-07-2003
		WO 0146909 A1	28-06-2001
WO 0177617 A	18-10-2001	IT MI20000806 A1	12-10-2001
		AU 4447301 A	23-10-2001
		EP 1281041 A1	05-02-2003
		WO 0177617 A1	18-10-2001
EP 1184640 A	06-03-2002	DE 10043354 A1	14-03-2002
		EP 1184640 A2	06-03-2002
		US 2002080343 A1	27-06-2002